

**MARLA ALESSANDRA DE ARAUJO**

**MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS NA ESTIMATIVA  
DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA SOJA NA  
REGIÃO DE PONTA GROSSA - PARANÁ**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Curso de Pós-Graduação em Ciências do Solo /DSEA/SCA/UFPR, Área de concentração: Qualidade e Sustentabilidade Ambiental, na linha de pesquisa: Desenvolvimento de tecnologias e planejamento para sustentabilidade agrícola e urbana.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza

**CURITIBA**

**2008**

Araujo, Marla Alessandra de  
Modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade da  
cultura da soja na região de Ponta Grossa – Paraná / Marla Alessandra de  
Araujo.— Curitiba, 2008.

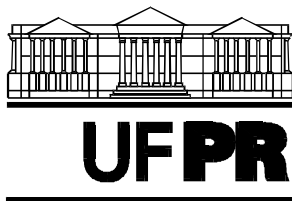
109 f.

Orientador: Jorge Luiz Moretti de Souza.

Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Setor de Ciências  
Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

1. Soja – Efeito da umidade do solo – Ponta Grossa (PR). 2.  
Climatologia agrícola – Ponta Grossa (PR). I. Título.

CDU 635.655(816.22)  
CDD 635.655




MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO (MESTRADO)  
Rua dos Funcionários, 1540-Curitiba/PR-80035-050-Fone/Fax 41-3350-5648  
Página: [www.pgcisolo.agrarias.ufpr.br/](http://www.pgcisolo.agrarias.ufpr.br/)  
E-mail: [pgcisolo@ufpr.br](mailto:pgcisolo@ufpr.br)


## P A R E C E R

Os Membros da Comissão Examinadora, designados pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pela candidata **MARLA ALESSANDRA DE ARAUJO**, sob o título: "**Modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa-Paraná**", requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo – Área de Concentração: Qualidade e Sustentabilidade Ambiental, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após haverem analisado o referido trabalho e argüido a candidata, são de Parecer pela **“APROVAÇÃO”** da Dissertação, completando assim, os requisitos necessários para receber o diploma de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração: "Qualidade e Sustentabilidade Ambiental"**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 23 de junho de 2008.

  
Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, Presidente.

  
Prof. Dr. José Antônio Frizzzone, 1º. Examinador.

  
Prof. Dr. Antonio Carlos Vargas Motta, 2º. Examinador.



*“Somos o que fazemos, mas somos,  
principalmente, o que fazemos para  
mudar o que somos”.*

*Eduardo Galeano*

## AGRADECIMENTOS

- ✧ A Deus, sinceramente obrigada;
- ✧ Ao meu pai Renato, que trabalha desde os oito anos e sempre deu o máximo de si para possibilitar a formação de seus três filhos;
- ✧ À minha mãe Jurema, pelo exemplo de garra e perseverança, que mesmo casada e com filhos pequenos voltou a estudar e concluiu com honra o ensino médio e, após 12 anos retornou às salas de aulas por aprovação no vestibular de uma universidade pública, enfrentou quatro anos de uma tripla jornada e conquistou o título de pedagoga pela UFPR;
- ✧ Ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e todos os professores que constituem o corpo docente, bem como o secretário Gerson e a laboratorista Elda;
- ✧ Ao professor Jorge Luiz Moretti de Souza, pelo convite à realização do mestrado, por todo apoio, amizade, acompanhamento, conselhos e paciência, estando presente em todas as etapas de realização desta dissertação, o que foi de vital importância para sua conclusão;
- ✧ Ao CNPq, pelo apoio financeiro concedido, sem o qual não seria possível a conclusão de meu mestrado;
- ✧ À Fundação ABC, em nome de Volnei Pauletti e Rodrigo Yoiti Tsukahara, que “abriram as portas” da instituição e gentilmente disponibilizaram dados e a área para a realização do presente trabalho;
- ✧ Ao Instituto Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), pela disponibilização dos dados meteorológicos da região de Ponta Grossa-PR;
- ✧ À minha primeira professora, Rosalina dos Santos, que mais que ler e escrever, me ensinou a importância da Educação e o valor da Cidadania;
- ✧ Às minhas grandes amigas Ester e Renata, meus verdadeiros anjos da guarda;
- ✧ À laboratorista Cléia, tia Nair e amigos Elaine, Hélio e Andréa, pelos sábios conselhos e amizade;
- ✧ À Dra. Carmem, Gilka, assistente social Neide e enfermeira Neila, pelo apoio e cuidado, exemplos de verdadeiras profissionais;
- ✧ Em especial ao Gilvano, pelo apoio, carinho, cuidado, companheirismo, paciência, risadas e amor. Obrigada por conceder-me os melhores momentos da minha vida.

## RESUMO

A cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é altamente exigente quanto ao suprimento adequado de suas necessidades fisiológicas. Um pequeno déficit hídrico ou carência nutricional, de acordo com o estágio de desenvolvimento, pode comprometer diretamente a produção final. O presente estudo teve por objetivo avaliar o desempenho de modelos simplificados e agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja, sob quatro sistemas de manejo (plantio direto, plantio convencional, preparo mínimo e plantio direto escarificado a cada três anos), na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná, visando previsão e planejamento de safras. O clima da região de Ponta Grossa é classificado como Cfb, segundo classificação de Köppen, e o solo da área experimental tratava-se de um solo corresponde a um Latossolo Vermelho distrófico típico (Typic Hapludox). Os dados reais de produtividade da cultura da soja foram disponibilizados pela Fundação ABC e totalizaram 11 ciclos produtivos, registrados entre os anos de 1989 a 2007. Os valores diários dos componentes do balanço hídrico foram determinados com o auxílio de um programa desenvolvido especialmente para esta finalidade. Os dados climáticos diários necessários foram disponibilizados pelo Instituto Meteorológico do Paraná (SIMEPAR). A evapotranspiração de referência foi estimada a partir do método de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO. As análises foram realizadas no Laboratório de Física do Solo e Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas /DSEA/SCA/UFPR. O ajuste dos coeficientes e fatores dos modelos agrometeorológicos foi realizado com o método dos mínimos quadrados, em análises de regressão simples ou múltipla. Verificou-se que os sistemas de manejo não proporcionaram diferença significativa nos valores de capacidade de água disponível no solo, nem nas produtividades reais registradas nas 11 safras estudadas. A maioria dos subperíodos dos estádios fenológicos registrou déficit (79,5%) e excedente (85,8%) hídrico para os quatro sistemas de manejo. Foram realizadas inúmeras tentativas de análise envolvendo a relação entre produtividade real com dados climáticos ou produtividade estimada com o auxílio de modelos. Tentou-se ajuste com modelos simplificados e modelos agrometeorológicos, utilizando coeficientes e fatores obtidos na bibliografia ou ajustados estatisticamente. As melhores análises de regressão foram obtidas quando se considerou a disposição temporal das produtividades reais das 11 safras da cultura da soja em dois grupos,

denominados “Ano 1” e “Ano 2”, em função da rotação de culturas na região. Os modelos STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979) e JENSEN (1968), utilizando coeficientes e fatores ajustados estatisticamente, apresentaram coeficientes de determinação iguais a: 0,7469 e 0,7387, respectivamente, para as estimativas da produtividade das safras “Ano 1”; e 0,8127 e 0,7802, respectivamente, para as estimativas das safras “Ano 2”. O ajuste dos coeficientes e fatores mostrou-se importante para a obtenção de estimativas de produtividade mais precisas por meio de modelos agrometeorológicos.

**Palavras-chave:** Modelagem. Planejamento de safras. *Glycine max*. Sistemas de manejo do solo. Penman-Monteith. Balanço hídrico.

## ABSTRACT

The soybean crop (*Glycine max* (L.) Merrill) is highly exigent as the appropriate supply of its physiological needs. Depending on its development stage, a little water deficit or nutritional deficiency may compromise the final production. This study aimed to evaluate the performance of simplified and agrometeorological models in the soybean crop productivity estimate, under four management systems (no-tillage, conventional tillage, minimum soil tillage and no-tillage with chisel tillage every three years) in the Ponta Grossa region, state of Paraná, for crops forecasting and planning. The climate in Ponta Grossa region is classified as Cfb according to Köppen. The soil of the experimental area is classified as Typic Hapludox, which is dystrophic. The real datas of soybean crop productivity were provided by the ABC Foundation and totaled 11 productive cycles, recorded between the years 1989 to 2007. The daily values of the water balance components were determined using a program developed especially for this purpose. The daily weather data needed were made available by the Meteorological Institute of Paraná (SIMEPAR). The reference evapotranspiration was estimated by the FAO Penman-Monteith method. The analyses were performed in the Soil Physics Laboratory and Modeling of Agricultural Systems Laboratory / DSEA / SCA / UFPR. The fit of the agrometereological models coefficients and factors was carried out by the least squares method, in single or multiple regression analyses. It was verified that the management systems did not provide significant difference both in the soil available water capacity values and in the real productivity registered in the 11 crops studied. The majority of the phenological stages recorded water deficit (79.5%) and water excess (85.8%) to the four management systems. Numberless attempts were made involving the relationship between real productivity with weather datas or with estimated productivity by agrometereological models. It was tried to adjust through simplified models and agrometereological models, using coefficients and factors obtained in the literature or adjusted statistically. The best regression analyses were obtained when it was considered the temporal arrangement of the real productivity of the 11 soybeans crops in two groups, which were called “Year 1” and “Year 2”, according to the crops rotation in the region. Using coefficients and factors statistically adjusted, the STEWART, HAGAN and PRUITT (1976) proposed by DOORENBOS and KASSAN (1979) and JENSEN (1968) models presented determination



coefficients of: 0.7469 and 0.7387, respectively, according to the productivity estimates of the “Year 1” crops, and 0.8127 and 0.7802, respectively, according to the productivity estimates of “Year 2” crops. The fit of the coefficients and factors proved to be important to obtain more accurate productivity estimates through agrometeorological models.

**Key words:** Modeling. Crops planning. *Glycine max*. Soil management systems. Penman-Monteith. Water balance.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>FIGURA 3.1 –</b>	Estádios fenológicos de um ciclo da cultura da soja propostos por COSTA (1996). ....	17
<b>FIGURA 4.1–</b>	Esquema da área experimental, contendo a cultura da soja nos diferentes sistemas de manejo: PD - plantio direto; PC - plantio convencional com uma aração e duas gradagens; PM - preparo mínimo com duas gradagens; PDE - plantio direto com uma escarificação a cada três anos (Fonte: Fundação ABC/Ponta Grossa). ....	29
<b>FIGURA 5.1 –</b>	Média da produtividade real da cultura da soja, nos quatro sistemas de manejo adotados na Estação Experimental da Fundação ABC, ao longo de 11 safras: PD – plantio direto; PC – plantio convencional; PM – preparo mínimo; e, PDE – plantio direto escarificado a cada três anos. ....	51
<b>FIGURA 5.2 –</b>	Balanço hídrico seqüencial diário para cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, para as safras: (a) 1991/92; (b) 1992/93; (c) 1994/95; (d) 1995/96; (e) 1997/98; (f) 1998/99; (g) 2000/01; (h) 2001/02; (i) 2003/04; (j) 2004/05; e, (k) 2006/07.....	60
<b>FIGURA 5.3 –</b>	Análise de regressão e coeficiente de determinação obtido da relação entre produtividade média e: (a) precipitação ( $P$ ), com a equação logarítmica; e (b) evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), com a equação linear. ....	67
<b>FIGURA 5.4 –</b>	Análise de regressão linear entre os valores reais de produtividade da cultura da soja e estimados com os modelos de: (a) HOWELL e HILER (1975) (b) DOORENBOS e KASSAN (1979); (c) STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979); (d) RAO, SARMA e CHANDER (1988); (e) JENSEN (1968); (f) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974), e (g) DOORENBOS e KASSAN (1979) modificado por CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA (1986), empregando os coeficientes ou fatores obtidos na bibliografia para as 11 safras estudadas. ....	69
<b>FIGURA 5.5 –</b>	Análise de regressão linear entre os valores reais de produtividade da cultura da soja e estimados com os modelos de: (a) DOORENBOS e KASSAN (1979); (b) STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979); (c) RAO, SARMA e CHANDER (1988); (d) JENSEN (1968); e, (e) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974), empregando os coeficientes ou fatores ajustados a partir de análise de regressão, considerando as 11 safras estudadas.....	71

<b>FIGURA 5.6 –</b>	Disposição temporal dos valores reais médios de produtividade da cultura da soja (média dos quatro sistemas de manejo), para a região de Ponta Grossa-PR. ....	73
<b>FIGURA 5.7 –</b>	Disposição temporal dos valores reais médios de produtividade da cultura da soja (média dos quatro sistemas de manejo), para a região de Ponta Grossa-PR, considerando o agrupamento das produtividades nas safras como: (a) “Ano 1”; e, (b) “Ano 2”.....	74
<b>FIGURA 5.8 –</b>	Análise de regressão e coeficiente de determinação obtido da relação entre produtividade média do agrupamento “Ano 1” e: (a) precipitação ( <i>P</i> ) (equação linear); (b) evapotranspiração de referência ( <i>ET<sub>o</sub></i> ) (equação polinomial de segundo grau).....	75
<b>FIGURA 5.9 –</b>	Análise de regressão e coeficiente de determinação obtido da relação entre produtividade média do agrupamento “Ano 2” e: (a) precipitação ( <i>P</i> ) (equação linear); e, (b) evapotranspiração de referência ( <i>ET<sub>o</sub></i> ) (equação polinomial de segundo grau).....	76
<b>FIGURA 5.10 –</b>	Análise de regressão linear entre os valores reais de produtividade da cultura da soja agrupados conforme “Ano 1” e estimados com os modelos de: (a) HOWELL e HILER (1975) (b) DOORENBOS e KASSAN (1979); (c) STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979); (d) RAO, SARMA e CHANDER (1988); (e) JENSEN (1968); (f) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974), e (g) DOORENBOS e KASSAN (1979) modificado por CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA (1986), empregando os coeficientes ou fatores obtidos na bibliografia (Tabela 5.15). ....	77
<b>FIGURA 5.11 –</b>	Análise de regressão linear entre os valores reais de produtividade da cultura da soja agrupados conforme “Ano 2” e estimados com os modelos de: (a) HOWELL e HILER (1975) (b) DOORENBOS e KASSAN (1979); (c) STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979); (d) RAO, SARMA e CHANDER (1988); (e) JENSEN (1968); (f) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974), e (g) DOORENBOS e KASSAN (1979) modificado por CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA (1986), empregando os coeficientes ou fatores obtidos na bibliografia (Tabela 5.15). ....	78
<b>FIGURA 5.12 –</b>	Análise de regressão linear entre os valores reais de produtividade da cultura da soja e estimados com os modelos de: (a) DOORENBOS e KASSAN (1979); (b) STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979); (c) RAO, SARMA e CHANDER (1988); (d) JENSEN (1968); e, (e) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974), empregando os coeficientes ou fatores ajustados a partir de análise de regressão, considerando as safras do agrupamento “Ano 1”. ....	81

**FIGURA 5.13** – Análise de regressão linear entre os valores reais de produtividade da cultura da soja e estimados com os modelos de: (a) DOORENBOS e KASSAN (1979); (b) STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979); (c) RAO, SARMA e CHANDER (1988); (d) JENSEN (1968); e, (e) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974), empregando os coeficientes ou fatores ajustados a partir de análise de regressão, considerando as safras do agrupamento “**Ano 2**”. .....82

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 3.1 –</b>	Descrição dos estádios fenológicos da cultura da soja. ....	16
<b>TABELA 4.1 –</b>	Relação dos modelos utilizados no trabalho, com as respectivas funções matemáticas e variáveis independentes. ....	27
<b>TABELA 4.2 –</b>	Esquema de rotação de culturas realizado na Estação Experimental da Fundação ABC, Ponta Grossa-PR. ....	28
<b>TABELA 4.3 –</b>	Histórico das médias das produtividades de soja na safra normal, obtidas na Estação Experimental da Fundação ABC, Ponta Grossa-PR. ....	30
<b>TABELA 4.4 –</b>	Duração dos estádios fenológicos dos cultivares da cultura da soja, com diferentes ciclos e seus respectivos coeficientes de cultivo ( <i>kc</i> ), sugeridos por COSTA (1996) e FARIAS et al. (2001), respectivamente. ....	37
<b>TABELA 4.5 –</b>	Porcentagem das frações granulométricas e parâmetros físicos do solo, na profundidade entre 0-15 cm, para cada sistema de manejo adotado pela Fundação ABC, Ponta Grossa-PR. ....	40
<b>TABELA 4.6 –</b>	Profundidade efetiva do sistema radicular da cultura da soja ( <i>z</i> ) nos seus diversos estádios fenológicos, sugeridos por FIETZ e URCHEI (2002) e COSTA (1996), respectivamente. ....	40
<b>TABELA 4.7 –</b>	Capacidade de água disponível no solo ( <i>CAD</i> ) para a cultura da soja, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo, na Estação Experimental da Fundação ABC, Ponta Grossa-PR. ....	41
<b>TABELA 5.1 –</b>	Análise de variância (ANOVA) para a média da produtividade real da cultura da soja, na região de Ponta Grossa-PR, em função dos quatro sistemas de manejo (PD, PC, PM e PDE), em 11 safras. ....	52
<b>TABELA 5.2 –</b>	Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – <b>Safra 1991/92</b> . ....	53
<b>TABELA 5.3 –</b>	Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – <b>Safra 1992/93</b> . ....	54
<b>TABELA 5.4 –</b>	Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – <b>Safra 1994/95</b> . ....	54

<b>TABELA 5.5 –</b>	Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – <b>Safr 1995/96</b> .....	55
<b>TABELA 5.6 –</b>	Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – <b>Safr 1997/98</b> .....	55
<b>TABELA 5.7 –</b>	Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – <b>Safr 1998/99</b> .....	56
<b>TABELA 5.8 –</b>	Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – <b>Safr 2000/01</b> .....	56
<b>TABELA 5.9 –</b>	Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – <b>Safr 2001/02</b> .....	57
<b>TABELA 5.10 –</b>	Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – <b>Safr 2003/04</b> .....	57
<b>TABELA 5.11 –</b>	Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – <b>Safr 2004/05</b> .....	58
<b>TABELA 5.12 –</b>	Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – <b>Safr 2006/07</b> .....	58
<b>TABELA 5.13 –</b>	Resumo da análise de variância para a capacidade de água disponível no solo (CAD) para a cultura da soja, considerando os estádios de desenvolvimento I a IV e quatro sistemas de manejo, na Estação Experimental da Fundação ABC, Ponta Grossa-PR.....	59
<b>TABELA 5.14 –</b>	Índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) para a cultura da soja, considerando os estádios fenológicos I (semeadura) e III (floração e enchimento de grãos), para os quatro sistemas de manejo, nas 11 safras analisadas na região de Ponta Grossa-PR.....	65
<b>TABELA 5.15 –</b>	Coeficientes ou fatores obtidos na bibliografia e utilizados nos seis modelos agrometeorológicos testados no presente estudo para a cultura da soja, na região de Ponta Grossa-PR. ....	68
<b>TABELA 5.16 –</b>	Índice “d” de concordância de WILLMOTT et al. (1985) dos sete modelos empregados para estimar a produtividade da cultura da soja, na região de Ponta Grossa-PR.....	84
<b>TABELA 5.17 –</b>	Equação, coeficientes, fatores e coeficiente de determinação dos modelos de melhor desempenho para estimar a produtividade da cultura da soja, na região de Ponta Grossa-PR. ....	84

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
3.1 ORIGEM E HISTÓRICO DA CULTURA DA SOJA.....	4
3.1.1 Importância da cultura .....	5
3.2 SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO .....	6
3.2.1 Plantio Convencional.....	7
3.2.2 Plantio Direto .....	9
3.2.3 Plantio Direto Escarificado.....	11
3.2.4 Preparo Mínimo.....	11
3.3 NECESSIDADES CLIMÁTICAS E HÍDRICAS DA CULTURA DA SOJA .....	12
3.4 ESTÁDIOS FENOLÓGICOS DA CULTURA DA SOJA .....	15
3.5 MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS PLANTA-CLIMA .....	18
3.5.1 Evapotranspiração .....	19
3.5.2 Precipitação pluvial .....	20
3.5.3 Produtividade potencial ( $Y_p$ ).....	20
3.5.4 Fator hídrico em função do estágio fenológico da cultura ( $\lambda$ ).....	21
3.5.5 Coeficiente de penalização da produtividade por déficit hídrico ( $ky$ ).....	21
3.6 BALANÇO HÍDRICO .....	21
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
4.1 MODELOS UTILIZADOS PARA ESTIMAR A PRODUTIVIDADE .....	26
4.2 LOCAL DE REALIZAÇÃO DAS ANÁLISES .....	28
4.2.1 Área experimental utilizada .....	29
4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS VARIÁVEIS, COEFICIENTES OU FATORES.....	30
4.3.1 Produtividade potencial ( $Y_p$ ).....	30
4.3.2 Evapotranspiração real ( $ER$ ) .....	31
4.3.3 Precipitação pluvial ( $P$ ) e evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ).....	31
4.3.4 Evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) .....	36
4.3.5 Parâmetros físico-hídricos para o armazenamento de água no solo.....	37
4.3.6 Fatores hídricos em função do estágio fenológico da cultura ( $\lambda$ ) .....	41
4.3.7 Fator excedente ( $fe$ ) .....	42

4.3.8 Coeficientes de penalização da produtividade por déficit ( $k_y$ ) e excedente ( $k_e$ ) hídrico.....	42
4.4 ANÁLISES DOS MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS .....	43
4.5 AJUSTE DOS COEFICIENTES $k_y$ , $k_{y_i}$ E FATOR $\lambda$ PARA A CULTURA DA SOJA, NA REGIÃO DE PONTA GROSSA-PR .....	43
4.5.1 Ajuste do coeficiente $k_y$ para todo o ciclo da cultura da soja .....	43
4.5.2 Ajuste dos coeficientes $k_{y_i}$ para cada estágio fenológico da cultura da soja .....	45
4.5.3 Ajuste dos fatores de penalização da produtividade por déficit hídrico em função do estágio fenológico da cultura ( $\lambda$ ) para o modelo de JENSEN (1968) .....	46
4.5.4 Ajuste dos fatores de penalização da produtividade por déficit hídrico em função do estágio fenológico da cultura ( $\lambda$ ) para o modelo de MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974) .....	48
4.6 ÍNDICE DE CONCORDÂNCIA DE WILLMOTT et al. (1985) PARA A CULTURA DA SOJA, NA REGIÃO DE PONTA GROSSA-PR .....	49
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>51</b>
5.1 ANÁLISE DA PRODUTIVIDADE REAL DA CULTURA DA SOJA, NA REGIÃO DE PONTA GROSSA-PR.....	51
5.2 BALANÇO HÍDRICO SEQUENCIAL PARA A CULTURA DA SOJA, NA REGIÃO DE PONTA GROSSA-PR.....	53
5.2.1 Considerações sobre os valores das componentes do balanço hídrico sequencial.....	53
5.3 DESEMPENHO DE MODELOS NA ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA SOJA, NA REGIÃO DE PONTA GROSSA-PR .....	67
5.3.1 Análise de regressão e correlação, entre produtividade e parâmetros climáticos, empregando modelos simplificados .....	67
5.3.2 Desempenho dos modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade.....	68
5.4 AJUSTE DOS COEFICIENTES $k_y$ , $k_{y_i}$ E FATOR $\lambda$ , PARA A CULTURA DA SOJA, NA REGIÃO DE PONTA GROSSA-PR .....	70
5.5 CONSIDERAÇÃO DO COMPORTAMENTO TEMPORAL DA PRODUTIVIDADE NA REGIÃO DE PONTA GROSSA.....	72
5.5.1 Análise de regressão e correlação, entre produtividade (“Ano 1” e “Ano 2”) e parâmetros climáticos, empregando modelos simplificados .....	75
5.5.2 Análise de regressão linear e correlação, entre produtividade real e estimada (“Ano 1” e “Ano 2”), empregando modelos agrometeorológicos, utilizando fatores e coeficientes recomendados na literatura.....	76
5.5.3 Análise de regressão linear e correlação, entre produtividade real e estimada (“Ano 1” e “Ano 2”), empregando modelos agrometeorológicos, utilizando fatores e coeficientes ajustados com os dados da região de Ponta Grossa-PR .....	80
5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>87</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>88</b>
<b>8 ANEXOS .....</b>	<b>96</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) apresenta alta capacidade produtiva, sendo que além de se tratar de uma fonte abundante de aproveitamento alimentício geral e diversificado, o grão possui alto valor protéico (até 50% proteína), o que a torna uma das culturas que mais investimentos recebeu historicamente, sendo alvo de grande número de pesquisas visando melhorar sua qualidade e produtividade (DROS, 2004; MARION, 2004). A cultura corresponde a maior fonte de proteína vegetal no mundo, em que a composição de aminoácidos é semelhante à proteína animal, maior do que do milho ou outras proteínas vegetais, tornando-a um componente ideal na dieta animal e humana (DROS, 2004).

A cultura apresenta um incomensurável papel como fonte de riqueza de forma direta (geração de renda ao produtor) ou indireta (geração de empregos, crescimento e desenvolvimento local, regional, nacional e mundial) ao longo de sua cadeia de produção. Desta forma, o complexo agroindustrial da soja tem contribuído com um superávit considerável na balança comercial brasileira (FARIAS et al., 2001). A cultura ocupa o topo do ranking das principais culturas no Estado do Paraná, cuja produção ultrapassou a marca de 11 milhões de toneladas nas safras 2006/07 e 2007/08. Neste contexto, a região de Ponta Grossa se destaca no Estado, alcançando uma produção de 1.374.750 toneladas de soja na safra normal de 2007/08, em 423 mil hectares de área plantada, ou seja, uma produtividade média de 3.250 kg·ha<sup>-1</sup>, o que equivale a aproximadamente 12,5% da produção do Estado, segundo dados da Secretaria da Agricultura e do Abastecimento do Paraná (SEAB, 2008a; SEAB, 2008b).

A cultura é altamente exigente quanto ao suprimento adequado de suas necessidades fisiológicas. Um pequeno déficit hídrico ou carência nutricional, de acordo com o estágio de desenvolvimento, pode comprometer diretamente a produção final.

A importância da água para as plantas deve-se à sua contribuição na manutenção e preservação de suas funções vitais. A água constitui aproximadamente 90% do peso da planta, atuando em praticamente todos os processos fisiológicos e bioquímicos do protoplasma. Seu movimento na planta, resultante de um gradiente de potencial, contribui para a translocação dos solutos absorvidos ou sintetizados pela raiz, dos compostos transportados até a folha e não utilizados, e de substâncias sintetizadas na folha (AWAD e CASTRO, 1992; FLOSS, 2004; TAIZ e ZEIGER, 2004; EMBRAPA, 2006).

O armazenamento de água no solo é um dos componentes do ciclo hidrológico que influencia diretamente a quantidade de água disponível para as culturas agrícolas, o que por sua vez afeta o seu desenvolvimento, crescimento, rendimento e a necessidade de irrigação. A possível mudança do clima terrestre pode afetar os componentes do ciclo hidrológico de ecossistemas terrestres e, conseqüentemente, a disponibilidade de recursos hídricos e a duração dos períodos de estiagem e enchente (STRECK e ALBERTO, 2006). Estresses abióticos, como secas, podem além de reduzir significativamente rendimentos em lavouras, restringir latitudes aos solos onde espécies comercialmente importantes podem ser cultivadas (FARIAS et al., 2001).

Segundo EMBRAPA (2006), a disponibilidade de água para a soja é importante principalmente em dois períodos de desenvolvimento: germinação-emergência e floração-enchimento de grãos. Déficits hídricos expressivos durante a germinação e a emergência levam a morte da semente e conseqüente desuniformidade de *stand*. Durante a floração e o enchimento de grãos, provocam alterações fisiológicas na planta, como o fechamento estomático e o enrolamento de folhas e, como conseqüência, causam a queda prematura de folhas e de flores e abortamento de vagens, resultando, por fim, em redução do rendimento de grãos.

Sob determinadas condições de clima, cultivo e operação, os modelos agrometeorológicos possibilitam a previsão de produtividades físicas da água a serem utilizadas nas análises econômicas e, são particularmente importantes em análises de produção agrícola quando a água é escassa. Para o processo de planejamento, esses modelos constituem o elemento básico de decisão dos planos de desenvolvimento e, relativamente à operação de projetos de irrigação, permitem tomar decisões sobre planos ótimos de cultivo e ocupação de área para produção econômica com base na água disponível. Possibilitam, também, a escolha correta da época de plantio, para que a cultura não fique exposta a déficits hídricos em momentos cruciais à obtenção de uma boa produção (VAUX e PRUITT, 1983; HOWELL, CUENCA e SOLOMON, 1992; FRIZZONE et al., 2005).

A partir da identificação dos modelos agrometeorológicos que melhor descrevem o comportamento da cultura a campo em uma determinada região, é possível inserir tais modelos em programas de simulação de produtividade, prever o impacto de mudanças climáticas sobre esta e, caso os eventos meteorológicos se comportem igual à média dos anos, indicar a melhor época de plantio para cada região.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho de modelos simplificados e agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja, sob quatro sistemas de manejo, na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná, visando previsão e planejamento de safras.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter parâmetros necessários ao processo de cálculo do modelo agrometeorológico para a cultura da soja;
- Estimar as produtividades da cultura da soja com modelos simplificados e agrometeorológicos, em função de parâmetros climáticos e hídricos, em quatro sistemas de manejo;
- Ajustar os coeficientes  $k_y$ ,  $k_{y_i}$  e  $\lambda$  presentes nos modelos agrometeorológicos estudados, para a cultura da soja, visando melhor adequação destes à região analisada.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 ORIGEM E HISTÓRICO DA CULTURA DA SOJA

Conforme a classificação botânica, a soja pertence à família Fabaceae, subfamília Faboideae, gênero *Glycine*, espécie *Glycine max* (L.) Merrill. Trata-se de uma planta nativa da Ásia, sendo considerada uma das culturas mais antigas daquela área. Com base na distribuição de *Glycine ussuriensis*, provável progenitor da soja atualmente cultivada, a origem seria na China, entre latitudes de 30° a 45° N, nas regiões norte e central (COSTA, 1996; MUNDSTOCK e THOMAS, 2005).

A mais antiga referência sobre soja na literatura aparece em um livro de medicina intitulado "Pen Ts'ao Kang Mu" (Matéria Médica), escrito pelo Imperador Shen Nung. Na literatura, as referências a esta obra aparecem com seis datas diferentes de publicação, entre os anos de 2838 a.C. a 2383 a.C. (ANUÁRIO BRASILEIRO DA SOJA, 2000).

Até aproximadamente 1894, término da guerra entre a China e o Japão, a produção de soja ficou restrita à China. Apesar de ser conhecida e consumida pela civilização oriental por milhares de anos, só foi introduzida na Europa no final do século XV, como curiosidade, nos jardins botânicos da Inglaterra, França e Alemanha (COSTA, 1996; EMBRAPA, 2007).

Na segunda década do século XX, o teor de óleo e proteína do grão começou a despertar o interesse das indústrias mundiais. No entanto, as tentativas de introdução comercial do cultivo do grão na Rússia, Inglaterra e Alemanha fracassaram, provavelmente, devido às condições climáticas desfavoráveis (EMBRAPA, 2007).

No Brasil, a soja parece ter sido primeiramente introduzida na Bahia, em 1882. Em 1908 foi introduzida em São Paulo, por imigrantes japoneses, e em 1914 foi introduzida no Rio Grande do Sul pelo professor Craig, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Foi no Rio Grande do Sul que a soja começou a ser cultivada em larga escala. O município de Santa Rosa foi o pólo de disseminação da cultura, que inicialmente expandiu-se pela região das missões. Até meados dos anos 30, esta era a região produtora de soja (MUNDSTOCK e THOMAS, 2005; SCHUSTER, 2007).

No Paraná, a geada que assolou a região norte do Estado, no ano de 1953, proporcionou a oportunidade para uma participação mais decisiva da soja na policultura dessa região. No ano seguinte, foram semeados 2.000 sacos de sementes nas ruas dos cafezais prejudicados pela geada, principalmente para fins adubação verde. Este foi considerado o primeiro plantio de soja em grande escala do Estado (FUNDAÇÃO CARGILL, 1982).

A explosão do preço da soja no mercado mundial, em meados de 1970, desperta ainda mais o interesse dos agricultores e do próprio governo brasileiro. O país se beneficia de uma vantagem competitiva em relação aos demais países produtores: o escoamento da safra brasileira ocorre na entressafra americana, quando os preços atingem as maiores cotações. Além disso, o baixo custo de produção em relação ao alto valor nutritivo, principalmente em proteínas especiais, faz da soja uma das melhores e mais baratas fontes de alimento energético em termos de calorias por unidade de custo de produção. Desde então, o país passou a investir em tecnologia para adaptação da cultura às condições brasileiras, processo liderado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (MARION, 2004; EMBRAPA, 2007).

Investimentos em pesquisa levaram à "tropicalização" da soja, permitindo, pela primeira vez na história, que o grão fosse plantado com sucesso, em regiões de baixas latitudes, entre o Trópico de Capricórnio e a Linha do Equador. Essa conquista dos cientistas brasileiros revolucionou a história mundial da soja e seu impacto começou a ser notado pelo mercado a partir do final da década de 80 e mais notoriamente na década de 90, quando os preços do grão começaram a cair. Atualmente, os líderes mundiais na produção mundial de soja são os Estados Unidos, Brasil, Argentina e China. Em conjunto esses países responderam por 90% da produção mundial de soja em grãos nos últimos cinco anos (CANZIANI, GUIMARÃES e WATANABE, 2006; EMBRAPA, 2007).

### 3.1.1 Importância da cultura

Como já visto, o desenvolvimento da cultura da soja é relativamente recente no Brasil, ganhando impulso a partir dos anos 70 e expandindo-se rapidamente desde então. No país, o complexo agro-industrial da soja incontestavelmente caracteriza-se pelo dinamismo, evidenciado pela rápida incorporação de novas técnicas agricultáveis ao sistema de produção e, principalmente, pelo fato de que todos os anos surgem novas variedades resistentes às principais doenças e pragas, e com maior potencial de produção, abrangendo todas as regiões produtoras do país (MARION, 2004).

Em 2004, o Brasil foi o segundo maior produtor mundial de soja, com produção de 50 milhões de toneladas, representando 25% da safra mundial, estimada em 200 milhões de toneladas. Esse montante foi menor que a produção de 2003, quando o país produziu 52 milhões de toneladas e participou com quase 27% da safra mundial (EMBRAPA, 2007).

CANZIANI, GUIMARÃES e WATANABE (2006) relatam que a soja é a principal demandante de insumos agrícolas no Brasil, especialmente fertilizantes e herbicidas. A produção agrícola no país é bastante tecnicizada, sendo que o nível tecnológico é relativamente homogêneo entre os produtores e as regiões brasileiras. Isso significa que na produção de soja há uma tecnologia ou sistema de produção “dominante”, que é adotada pela maioria dos produtores, tanto de soja convencional, como de soja transgênica. A produção se destina basicamente à produção de farelo e óleo. O farelo de soja é a principal fonte de proteína na elaboração de rações animais em termos mundiais com 67,7% do volume total de farelos e farinhas a serem produzidos no mundo na safra 2006/07.

Entre várias culturas no mercado paranaense, a soja tem sido uma cultura de suma importância econômica, levando-se em conta a sua representatividade tanto no âmbito das exportações quanto na renda gerada pelas atividades rurais, desenvolvendo a agricultura como um todo e gerando renda em todas as suas ramificações. O Paraná é o segundo produtor nacional de soja, a cultura ocupa o topo do ranking das principais culturas do Estado, cuja produção ultrapassou a marca de 11 milhões de toneladas nas safras 2006/07 e 2007/08 (SEAB, 2008a). Uma das regiões no Estado que se destaca é a Região de Ponta Grossa, a qual é composta pelos municípios de Arapoti, Carambeí, Castro, Imbaú, Ipiranga, Ivaí, Jaguariaíva, Ortigueira, Palmeira, Piraí, Ponta Grossa, Porto Amazonas, Reserva, São João do Triunfo, Sengés, Telêmaco, Tibagi e Ventania. Segundo SEAB (2008b), a produção de soja desta região na safra normal de 2007/08 atingiu 1.374.750 toneladas em uma área plantada de 423 mil hectares, equivalente a uma produtividade de  $3.250 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

### 3.2 SISTEMAS DE MANEJO DO SOLO

Entende-se por sistema agrícola a utilização de uma determinada área com diversas culturas em sucessão, intercalando-se, ou não, espécies destinadas apenas ao fornecimento de material orgânico e com diferentes formas de manejo do solo e de utilização de insumos (SILVA e SILVEIRA, 2002).

O preparo do solo refere-se às operações mecânicas realizadas a fim de mantê-lo em condições ótimas para a germinação, emergência das plântulas, desenvolvimento e produtividade das culturas. O sistema de manejo interfere em muitos atributos do solo como o conteúdo de matéria orgânica, disponibilidade de nutrientes, capacidade de troca de cátions, pH, massa específica, infiltração, condutividade hidráulica, conteúdo de água disponível e estabilidade de agregados. Esta interferência é resultante da diminuição do tamanho de agregados, aumento temporário do espaço poroso e da atividade microbiana, além da incorporação de resíduos, a qual deixa o solo descoberto (VEIGA e AMADO, 1994; CALEGARI et al., 2006; LLANILLO et al., 2006).

Contudo, o efeito do preparo não depende apenas do implemento empregado, mas também da forma e intensidade de seu uso (VEIGA e AMADO, 1994). BUHLER (1995) considera preparo conservacionista aquele que proporciona a menor mobilização possível do solo, visando preservar sua estruturação, mantendo no mínimo 30% da superfície coberta com resíduos culturais, entre o período compreendido da colheita da cultura anterior e a implantação da cultura seguinte.

De maneira geral, sistemas de manejo baseados em um preparo mais intenso, resultam na pulverização excessiva do solo, levando a aceleração dos processos de degradação (SEIXAS, ROLOFF e RALISCH, 2005). Já os manejos conservacionistas imprimem características químicas e biológicas distintas ao solo, de maneira a modificar a distribuição e morfologia das raízes, com reflexos no crescimento da parte aérea, interagindo na produtividade (KLEPKER e ANGHINONI, 1995).

Os próximos itens descrevem os quatro principais sistemas de manejo do solo empregados por produtores agrícolas, principalmente no Estado do Paraná.

### 3.2.1 Plantio Convencional

O plantio convencional corresponde a um preparo de solo intenso, o qual envolve uma ou mais arações e duas gradagens. Neste sistema de manejo os resíduos são incorporados na quase totalidade, deixando a superfície a mercê da ação erosiva das chuvas.

Como vantagem do plantio convencional pode ser mencionado o momento inicial pós-preparo, em que a pulverização do solo melhora o contato solo-semente. Segundo POPINIGIS (1985), este fato facilita a germinação, e no caso da inexistência de um selamento superficial, também facilita a emergência das plântulas. DEUBER (1992), PAULA JÚNIOR e VENZON

(2007) comentam que o plantio convencional pode propiciar maior controle de plantas daninhas, pelo enterrio das sementes em maiores profundidades, dificultando a emergência das plântulas na superfície, favorecer a uniformização do terreno, o que otimiza o trabalho do maquinário agrícola, e melhorar o aquecimento do solo, no caso de regiões frias.

Contudo, quando o solo é excessivamente pulverizado, é favorecida a formação de um selo superficial, o qual possui pequena espessura, mas reduz substancialmente a taxa de infiltração de água no solo, aumentando a enxurrada e a erosão e, também, funciona como impedimento à emergência das plântulas (VEIGA e AMADO, 1994; RICHART et al., 2005; SEIXAS, ROLOFF e RALISCH, 2005).

A utilização intensificada de maquinários agrícolas como o arado e a grade pesada, em uma mesma profundidade de corte (geralmente 10-20 cm), possibilita a formação de uma camada compactada subsuperficial (logo abaixo da profundidade de corte do implemento), vulgarmente denominada “pé de arado ou pé de grade”. O “pé de grade” reduz a taxa de infiltração de água no solo, o que, por sua vez, favorece maior escoamento superficial e, conseqüentemente a erosão do solo. Tal camada funciona também como impedimento a penetração de raízes, levando à formação de um sistema radicular mais superficial, deixando, assim, as plantas mais suscetíveis a estresses hídricos e ao acamamento (EMBRAPA, 2006).

Além dos problemas já citados anteriormente, pode-se comentar ainda que: a perda da estrutura do solo aumenta sua erodibilidade, tornando-o mais suscetível à compactação; a ausência de cobertura vegetal na superfície do solo aumenta a perda de umidade e deixa-o sujeito a ocorrência de grandes oscilações térmicas; e, a redução no conteúdo de matéria orgânica devido à oxidação (MELLO et al., 1983; BERTOL et al., 2001) afeta diretamente a sustentabilidade dos sistemas, principalmente pelo declínio da produtividade (LLANILLO et al., 2006).

COSTA et al. (2003) relataram que, embora tenham sido adotadas práticas mitigadoras do processo de degradação física do solo em sistema de preparo convencional, tais como rotação de culturas e manutenção dos resíduos culturais no solo, este processo pareceu estar acentuando-se ao longo do tempo.

Desta forma, sistemas conservacionistas de manejo do solo como o preparo mínimo e o plantio direto, têm sido apresentados e adotados como uma opção para assegurar a sustentabilidade do uso agrícola dos solos (SILVA, CURI e BLANCANEUX, 2000; LLANILLO et al., 2006).



### 3.2.2 Plantio Direto

Do ponto de vista técnico, o sistema de manejo deve contribuir para a manutenção ou melhoria da qualidade do solo e do ambiente, bem como para a obtenção de adequadas produtividades das culturas em longo prazo (COSTA et al., 2003). Partindo desta premissa, pesquisas sobre sistemas conservacionistas iniciaram-se a partir da segunda metade da década de 1970, com maior ênfase nas décadas de 1980 e 1990 (LLANILLO et al., 2006).

VEIGA e AMADO (1994) definem o plantio direto como a técnica de colocação da semente ou muda em sulco ou cova em solo não revolvido, com largura e profundidade suficientes para obter adequada cobertura e melhor contato solo-semente. As entrelinhas permanecem cobertas pela resteva de culturas anteriores ou de plantas cultivadas especialmente com esta finalidade. Segundo estes preceitos, o solo permanece com no mínimo 50% da cobertura e o revolvimento máximo para a abertura do sulco ou cova é de 25% a 30% da área total, o que se traduz em economia de tempo e combustível para implantação das culturas.

Diversos autores (VEIGA e AMADO, 1994; KLEPKER e ANGHINONI, 1995; SILVA, CURI e BLANCANEUX, 2000; COSTA et al., 2003; RICHART et al., 2005; CALEGARI et al., 2006; EMBRAPA, 2006; LLANILLO et al., 2006) consideram o plantio direto como o sistema de manejo do solo mais eficiente quanto ao controle da erosão, devido à manutenção da cobertura em superfície e a mínima movimentação do solo. Contudo, BERTOL et al. (2004) salienta a importância da manutenção de quantidade adequada de resíduos na superfície do solo e a necessidade de se adotar práticas conservacionistas de suporte.

A presença da cobertura na superfície do solo contribui para evitar grandes oscilações de temperatura no mesmo, diminui a perda de umidade por evaporação (aumentando a tolerância das culturas a períodos de estiagem), fornece energia para atividade microbiana, agrega matéria orgânica (ajudando na melhoria da estabilidade de agregados), favorece a formação de bioporos por meio da penetração de raízes e atividade da macro e mesofauna (aumentando a taxa de infiltração e difusão de gases), reduz efeitos de impacto da gota de chuva e aumenta a rugosidade da superfície. É importante observar que a rugosidade superficial corresponde a um dos fatores que influencia diretamente na redução da velocidade e volume de enxurrada, auxiliando no aumento da taxa de infiltração de água no solo (VEIGA e AMADO, 1994; SILVA, CURI e BLANCANEUX, 2000; BERTOL et al., 2001; GENRO

JÚNIOR, REINERT e REICHERT, 2004; EMBRAPA, 2006; FAVARETTO, COGO e BERTOL, 2006).

A menor mobilização do solo, como já descrito anteriormente, contribui para a melhoria da qualidade de sua estrutura, aumenta a atividade microbiana, reduz perda de matéria orgânica por oxidação, o que contribui diretamente para o aumento da estabilidade de agregados, reduzindo a erodibilidade do solo (MELLO et al., 1983; SILVA, CURI e BLANCANEUX, 2000; BERTOL et al., 2001; CALEGARI et al., 2006).

Como desvantagens no sistema de plantio direto, tem-se o favorecimento à incidência de: algumas plantas daninhas, pela manutenção de seu banco de sementes próximo à superfície (DEUBER, 1992); pragas, pelo não revolvimento do solo e pela presença da resteva, o que possibilita que pragas consigam completar seu ciclo e neles encontrar proteção (BIANCO, 2005; SOUZA, 2005a); e, doenças, evitando a desidratação e conseqüente inviabilização de estruturas de resistência, bem como no que se refere a parasitas facultativos que sobrevivem saprofiticamente na entressafra (AMORIM, 1995).

Outro problema está relacionado ao trânsito das máquinas sobre o solo com maior teor de umidade devido à presença da cobertura, o qual resulta em compactação superficial (de 3 a 6 cm de profundidade) e diminuição da porosidade, o que pode propiciar menores taxas de permeabilidade e gerar restrições ao desenvolvimento radicular (MELLO et al., 1983; BERTOL et al., 2001; SEIXAS, ROLOFF e RALISCH, 2005; CALEGARI et al., 2006; FAVARETTO, COGO e BERTOL, 2006). Devido a esta característica, o sistema de manejo plantio direto apresenta maior complexidade administrativa com relação aos demais (MELLO et al., 1983).

Convém salientar que antes de implantar o sistema de manejo plantio direto é necessário observar alguns pré-requisitos como: eliminação da compactação ou camadas adensadas; a superfície do terreno deve ser nivelada; correção da acidez a uma profundidade de 20 a 25 cm; elevação do nível de fertilidade; produção de resíduos vegetais na ordem de 5 a 6 Mg·ha<sup>-1</sup>·ano<sup>-1</sup>, os quais devem ser distribuídos uniformemente em toda a área. É recomendável evitar áreas com problemas de drenagem e deve-se realizar acompanhamento periódico da fertilidade do solo (MELLO et al., 1983; EMBRAPA, 2006).

### 3.2.3 Plantio Direto Escarificado

Para reduzir a compactação no sistema de plantio direto, vêm sendo estudadas técnicas que permitam a descompactação do solo utilizando implementos de hastes, como escarificadores, que produzem superfícies mais rugosas em relação aos implementos de discos. Os objetivos são aumentar a porosidade, reduzir a densidade, romper o selamento superficial e camadas subsuperficiais compactadas, sem que haja grandes perdas de matéria orgânica e pulverização da camada manejada (COGO, MOLDENHAUER e FOSTER, 1984; RENARD et al., 1997).

Além disso, a rugosidade gerada pela escarificação ajuda a reduzir a velocidade da enxurrada, pois se constitui como um obstáculo ao escoamento superficial, auxiliando no controle da erosão hídrica e incrementando a taxa de infiltração de água no solo (RENARD et al., 1997).

CAMARA e KLEIN (2005) avaliaram o efeito da escarificação em áreas sob o sistema de manejo plantio direto, confirmando que a escarificação do solo reduziu a densidade e aumentou a rugosidade superficial, condutividade hidráulica e taxa de infiltração de água no solo. Transcorridos seis meses após a escarificação, os autores observaram que o solo apresentou níveis de restos culturais na superfície semelhantes aos registrados em área de plantio direto em que não foi realizada esta operação.

### 3.2.4 Preparo Mínimo

Embora o sistema de manejo plantio direto venha se mostrando eficiente quanto ao controle da erosão hídrica, o seu uso tem se limitado a regiões onde o regime hídrico permite o desenvolvimento satisfatório de culturas de inverno, sendo insuficiente a quantidade de massa produzida para cobertura nestes locais (CASTRO et al., 1986).

Neste sentido, é importante a escolha de outro sistema de manejo que realize um preparo reduzido, com menor número de operações, mantendo parte dos resíduos na superfície e não pulverizando excessivamente o solo, permitindo bom desenvolvimento das culturas e eficiente controle da erosão (CASTRO et al., 1986; VEIGA e AMADO, 1994). Várias são as possíveis combinações de implementos, destacando-se as seguintes: uma aração e uma gradagem, duas gradagens, uma gradagem, uma escarificação e uma gradagem ou, ainda, cultivo mínimo em condições de topografia muito acidentada (VEIGA e AMADO, 1994).

Os resultados obtidos por ELTZ et al. (1984) confirmaram a viabilização do desenvolvimento das culturas aliado a um eficiente controle da erosão a partir do emprego do sistema de manejo preparo mínimo. Os autores avaliaram as perdas de solo e água por erosão em diferentes sistemas de manejo e coberturas vegetais do solo, concluindo que a realização do preparo mínimo para o plantio do trigo em sucessão a soja, reduziu 25,2% e 79,5% as perdas de solo em relação aos sistemas de manejo plantio direto e convencional, respectivamente. Quanto à perda de água, o desempenho do preparo mínimo foi semelhante a todas as variações do plantio direto, bem como foi superior a todas as do preparo convencional.

Pelos motivos já comentados anteriormente, os resultados obtidos com o sistema preparo mínimo são possíveis graças ao reduzido revolvimento do solo e a manutenção de uma porcentagem da cobertura sobre o solo (MELLO et al., 1983; VEIGA e AMADO, 1994; SILVA, CURI e BLANCANEUX, 2000; BERTOL et al., 2001; CALEGARI et al., 2006; EMBRAPA, 2006; FAVARETTO, COGO e BERTOL, 2006). DENARDIN (1987) afirma que a manutenção de 30% de cobertura na superfície do solo é capaz de reduzir 50% das perdas de solo por erosão e, a partir desta porcentagem de cobertura, BUHLER (1995) considera o sistema como conservacionista. Contudo, CASTRO et al. (1986) alertam que as perdas anuais de solo devem estar dentro dos limites de tolerância para o solo em questão, devendo ser adotadas outras práticas conservacionistas de suporte, como terraceamento do terreno.

### 3.3 NECESSIDADES CLIMÁTICAS E HÍDRICAS DA CULTURA DA SOJA

A imprevisibilidade das variações climáticas confere à ocorrência de adversidades climáticas o principal fator de risco e de insucesso no cultivo da soja (FARIAS et al., 2001). Dentre os elementos do clima, os que apresentam maior influência sobre o comportamento e desenvolvimento desta cultura são: a temperatura, o fotoperíodo e a disponibilidade hídrica (FUNDAÇÃO CARGILL, 1982; FARIAS, 1994). O déficit hídrico, normalmente, é o principal fator responsável por perdas na lavoura (FUNDAÇÃO CARGILL, 1982; FARIAS et al., 2001).

O conhecimento da quantia de água consumida pela cultura em cada um dos vários períodos de crescimento permite ajustar as datas da semeadura de forma que as fases de crescimento mais críticas coincidam com os períodos aos quais é mais provável a água estar disponível (FARIAS et al., 2001).

Segundo FLOSS (2004), dentro de limites, a cultura da soja mostra notável capacidade de adaptar-se a condições de deficiência hídrica, provavelmente pela alta capacidade de formação de flores ao longo do período de florescimento. MUNDSTOCK e THOMAS (2005) acrescentam o fato da soja possuir sistema radicular pivotante, o qual atinge grandes profundidades em busca de água, acrescido da rápida recuperação do metabolismo e grande quantidade de reservas temporárias nas estruturas vegetativas, permitem à planta manter o crescimento mesmo sob regime de estresse. Contudo, solos encharcados são prejudiciais ao desenvolvimento da cultura (FLOSS, 2004).

A necessidade total de água na cultura da soja, para obtenção do máximo rendimento, varia entre 450 a 800 mm·ciclo<sup>-1</sup>, dependendo das condições climáticas, do manejo da cultura e da duração do ciclo (EMBRAPA, 2006). A disponibilidade de água é importante, principalmente, em dois períodos de desenvolvimento da soja: germinação-emergência e floração-enchimento de grãos. Durante o primeiro período, tanto o excesso quanto o déficit de água são prejudiciais à obtenção de uma boa uniformidade na população de plantas. A semente de soja necessita absorver, no mínimo, 50% de seu peso em água para assegurar boa germinação. Nessa fase, o conteúdo de água no solo não deve exceder a 85% do total máximo de água disponível e nem ser inferior a 50% (POPINIGIS, 1985; BERLATO, MATZENAUER e BERGAMASCHI, 1986; EMBRAPA, 2006).

MARION (2004) afirma que muitos estudos têm verificado que a ocorrência de deficiência hídrica durante a germinação-emergência e floração-enchimento de grãos acarreta em perdas significativas na produtividade, porque estes estádios envolvem de forma direta a formação dos componentes primários do rendimento, que compreendem: número de plantas por área, número de legumes por planta, número de grãos por legume e peso médio de grãos. Além disso, MUNDSTOCK e THOMAS (2005) afirmam que a falta de água em qualquer estágio de desenvolvimento altera a quantidade de massa produzida, conseqüentemente, afetando o balanço entre o crescimento vegetativo e o reprodutivo.

Analisando os trabalhos de FUNDAÇÃO CARGILL (1982); CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA (1986); MUNDSTOCK e THOMAS (2005); EMBRAPA (2006) e STRECK e ALBERTO (2006), pode-se verificar que o fornecimento de água a cultura da soja é importante na maior parte do seu ciclo. Como se trata de uma cultura altamente tecnificada, todo o processo de colheita é realizado mecanicamente e para tal é necessário que no fim da maturação fisiológica o fornecimento de água seja reduzido drasticamente, possibilitando o alcance da umidade necessária para colheita e à própria operação de colheita. Neste momento,

RICHART et al. (2005) salientam a importância de que o solo esteja com pouca umidade para facilitar o tráfego das máquinas e para a própria conservação do solo, reduzindo o potencial compactador desta operação, quando comparada a uma condição de solo úmido.

A soja tem características peculiares na sua adaptação aos diferentes locais de cultivo, especialmente na reação ao fotoperíodo e temperatura do ar da região, os quais regulam a época de floração, bem como o zoneamento agroclimático dos cultivares. Tais aspectos são muito relevantes, pois determinam em quanto tempo a planta se desenvolve no período vegetativo, desenvolvimento este que tem alta relação com a produção de grãos (MUNDSTOCK e THOMAS, 2005).

Segundo COSTA (1996) e EMBRAPA (2006), a soja adapta-se melhor a temperaturas do ar entre 20 °C e 30 °C, sendo a temperatura ideal para seu crescimento e desenvolvimento em torno de 30 °C. Temperaturas abaixo de 13 °C são supressoras ao seu desenvolvimento.

Outro ponto importante é que a planta de soja realiza associações simbióticas com bactérias da família Rhizobiaceae, processo denominado nodulação e que ocorre no sistema radicular da planta. Quando o rizóbio promove a infecção no pêlo radicular, a associação simbiótica é estabelecida, então a planta torna-se capaz de fixar nitrogênio atmosférico nestes pontos, denominados nódulos. O mecanismo de fixação que ocorre no interior dos nódulos trata-se de um complexo enzimático, denominado nitrogenase, este rompe a tripla ligação existente entre os átomos de N que formam a molécula do N<sub>2</sub> e utilizam esses átomos para produzir duas moléculas de amônia (NH<sub>3</sub>), que são fornecidas à planta para que esta sintetize compostos nitrogenados (ALBINO e CAMPO, 2001; TAIZ e ZEIGER, 2004).

Contudo, FUNDAÇÃO CARGILL (1982) e EMBRAPA (2006) afirmam que a temperatura do solo pode ter efeito altamente prejudicial sobre a simbiose. A semeadura em solos quentes e secos diminui a sobrevivência das bactérias sobre as sementes de soja inoculadas, retarda ou impede a germinação e prejudica a formação de nódulos. Temperaturas máximas diurnas de solo, acima de 33 °C, prejudicam principalmente a formação dos nódulos, seu desenvolvimento e a eficiência nodular, havendo diferenças entre distintas variedades de soja e raças de rizóbio. A faixa de temperatura do solo adequada para a semeadura varia de 20 °C a 30 °C, sendo 25 °C a temperatura ideal para uma emergência rápida e uniforme.

A sensibilidade ao fotoperíodo é característica variável entre cultivares, ou seja, cada cultivar possui seu fotoperíodo crítico, acima do qual o florescimento é atrasado. Por isso, a soja é considerada “planta de dias curtos”. Em função dessa característica, a faixa de

adaptabilidade de cada cultivar varia à medida que se desloca em direção ao norte ou ao sul. Entretanto, cultivares que apresentam a característica “período juvenil longo”, possuem adaptabilidade mais ampla, possibilitando sua utilização em faixas mais abrangentes de latitudes (locais) e de épocas de semeadura (CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA, 1986; EMBRAPA, 2006; STRECK e ALBERTO, 2006).

MUNDSTOCK e THOMAS (2005) ressaltam que a exigência por um fotoperíodo pode ser modificada pela temperatura (especialmente a noturna). As baixas temperaturas retardam o florescimento, possivelmente interferindo na reação ao fotoperíodo. Desta maneira, uma mesma cultivar pode ter ciclo vegetativo variável de ano a ano no mesmo local ou região para região, na mesma latitude.

### 3.4 ESTÁDIOS FENOLÓGICOS DA CULTURA DA SOJA

Como já citado por FARIAS et al. (2001), a grande importância do conhecimento dos estádios de crescimento da cultura advém da possibilidade de ajuste das datas da semeadura, de forma que as fases de crescimento mais críticas coincidam com os períodos aos quais é mais provável o suprimento das necessidades da cultura, com isso, reduzindo perdas em produtividade.

MUNDSTOCK e THOMAS (2005) também salientam a necessidade de ajuste da época de plantio, pois quando ocorre florescimento precoce, ou seja, poucas semanas após a semeadura, não há número suficiente de ramos e folhas e, em decorrência, o número de nós de onde são geradas as flores é extremamente reduzido. Situação oposta ocorre com cultivares que retardam excessivamente o florescimento e há crescimento vegetativo exagerado. Forma-se um grande número de ramos e nós, nos quais podem se originar flores, mas o aborto floral e de legumes vai ser muito elevado, causando o desbalanço entre o crescimento vegetativo e reprodutivo.

A Tabela 3.1 e Figura 3.1 apresentam uma descrição simplificada dos principais estádios fenológicos de um ciclo da cultura da soja, de acordo com as recomendações de COSTA (1996).

De acordo com a duração do ciclo, os cultivares de soja são classificados como precoce (até 115 dias), semiprecoce (116 a 125 dias), médio (126 a 137 dias), semitardio (138 a 150 dias) e tardio (> 150 dias) (EMBRAPA, 2006). Contudo, a duração do ciclo pode variar

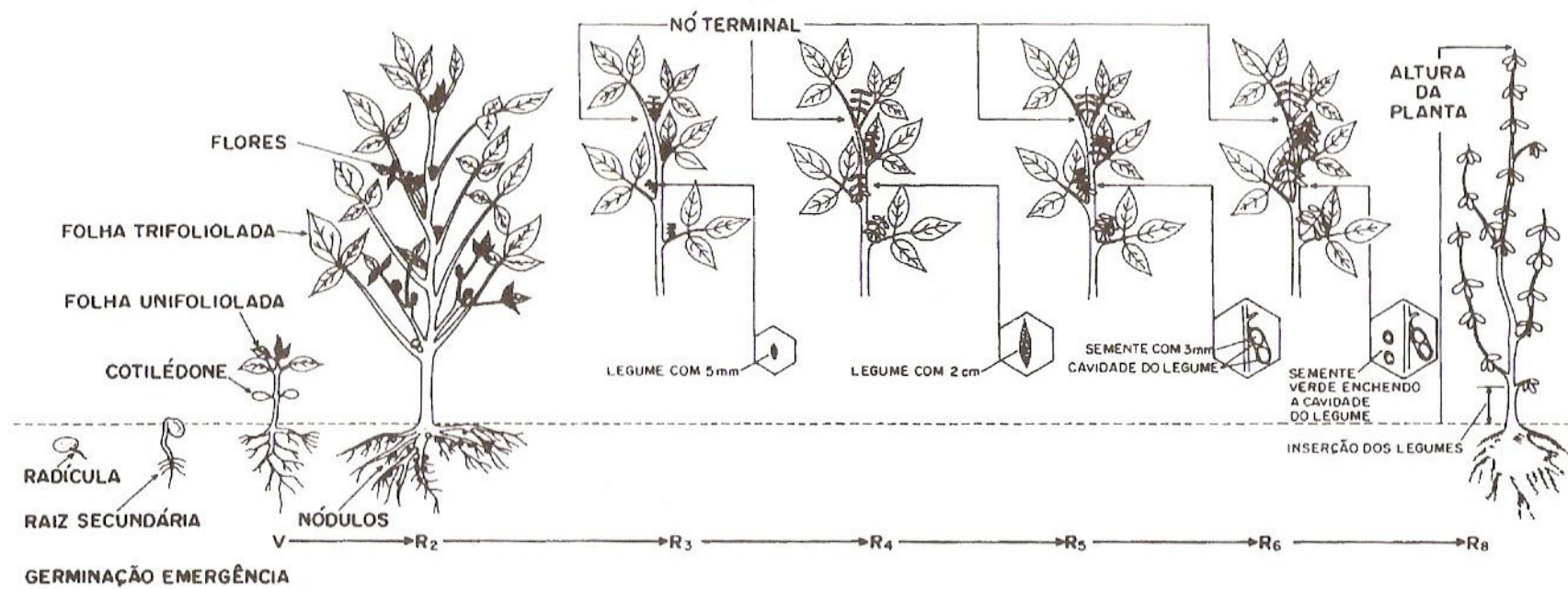
quando a cultura é exposta a diferentes climas, faixas de latitude, altitudes, entre outros (FUNDAÇÃO CARGILL, 1982).

**TABELA 3.1** – Descrição dos estádios fenológicos da cultura da soja.

<b>Estádio</b>	<b>Subtítulo</b>	<b>Descrição</b>
<b>I. Fase Vegetativa</b>		
VE	Emergência	Cotilédones acima da superfície do solo
VC	Estádio cotiledonar	Folhas primárias com as margens não mais se tocando
V1	Primeiro nó	Folhas primárias desenvolvidas
V2	Segundo nó	Folha trifoliada desenvolvida no nó acima das folhas primárias
V3	Terceiro nó	Três nós do caule com folhas desenvolvidas começando com o nó das folhas primárias
Vn	Enésimo (último) nó	“n” número de folhas desenvolvidas começando com o nó das folhas primárias
<b>II. Fase Reprodutiva</b>		
R1	Início do florescimento	Uma flor aberta em qualquer nó do caule
R2	Florescimento completo	Uma flor aberta em um dos dois últimos nós do caule com folha desenvolvida
R3	Florescimento	Flores nos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida
R4	Início da formação de legumes	Um legume com 5 mm, em um dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida
R5	Formação de legumes	Um legume com 2 cm, em um dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida
R6	Início do enchimento de grãos	Grãos com 3 mm, em um dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida
R7	Máximo volume de grãos	Legume contendo, ao menos, um grão verde que ocupa toda a sua cavidade, em um dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida
R8	Maturação fisiológica	Um legume normal, no caule, que atingiu a cor de legume maduro do referido cultivar
R9	Maturação	95% dos legumes atingiram a cor de legume maduro do referido cultivar

Fonte: COSTA (1996)





**FIGURA 3.1** – Estádios fenológicos de um ciclo da cultura da soja propostos por COSTA (1996).

### 3.5 MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS PLANTA-CLIMA

Vários fatores referentes ao solo, à planta e à atmosfera interagem entre si determinando a produtividade das culturas agrícolas. Certamente existe uma relação funcional entre esses fatores e a produção das culturas, característica de cada condição ambiental (FRIZZONE et al., 2005).

Devido à sua contribuição na manutenção e preservação das funções vitais, a água é considerada essencial para as plantas e outros organismos. A água constitui aproximadamente 90% do peso da planta, atuando em praticamente todos os processos fisiológicos e bioquímicos do protoplasma. Seu movimento na planta, resultante de um gradiente de potencial, contribui para a translocação dos solutos absorvidos ou sintetizados pela raiz, dos compostos transportados até a folha e não utilizados, e de substâncias sintetizadas na folha (AWAD e CASTRO, 1992; TAIZ e ZEIGER, 2004; EMBRAPA, 2006).

FRIZZONE et al. (2005) salientam que, considerando o grande número de variáveis que influenciam a produtividade das culturas agrícolas e a complexidade das relações que afetam a quantidade e qualidade do produto, a produtividade pode ser expressa exclusivamente em função da água utilizada pelo cultivo, estando todas as outras variáveis inerentes à produtividade fixas em nível ótimo.

Desta forma, modelos agrometeorológicos consideram somente a influência de fatores climáticos sobre a produtividade da cultura, funcionando como um medidor de eficiência. Os métodos utilizados para estabelecer a relação planta-clima variam desde a simples correlação, até modelos complexos, ou seja, funções de produção que podem considerar diferentes parâmetros envolvidos no sistema produtivo (PICINI, 1998).

As principais críticas aos modelos agrometeorológicos referem-se às suas aplicações, consideradas muitas vezes específicas para uma localidade, ou incompletas, no sentido de omitir efeitos de outros fatores e suas interações com a água (FRIZZONE et al., 2005).

Porém, diversos autores (JENSEN, 1968; DOORENBOS e KASSAN, 1979; VAUX e PRUITT, 1983; HOWELL, CUENCA e SOLOMON, 1992; MATZENAUER, 1994; CARVALHO et al., 2003; FRIZZONE et al., 2005) ressaltam que os modelos agrometeorológicos e funções de produção são necessários para prever, sob determinadas condições de clima, cultivo e operação, as produtividades físicas da água a serem utilizadas nas análises econômicas, e são particularmente importantes em análises de produção agrícola

quando a água é escassa. Para o processo de planejamento, os modelos agrometeorológicos constituem uma ferramenta simples e básica à decisão dos planos de desenvolvimento e, relativamente à operação de projetos de irrigação, permitem tomar decisões sobre planos ótimos de cultivo e ocupação de área para produção econômica com base na água disponível.

Além disso, SANTOS e CAMARGO (2006) destacam que o conhecimento prévio das safras agrícolas torna-se cada vez mais uma questão estratégica para o país, seja para o planejamento do abastecimento interno, seja para a orientação das ações referentes ao mercado externo.

DALLACORT et al. (2006) sugerem que, para fins de estimativa da produtividade de cultivos, os modelos baseados em princípios agrometeorológicos mais importantes são aqueles que simulam as fases de desenvolvimento e de maturação das culturas, a disponibilidade de umidade no solo e os efeitos do estresse hídrico no rendimento da cultura. Os modelos são dinâmicos e funcionais, pois descrevem mudanças diárias nas variáveis da cultura, considerando os principais processos morfofisiológicos que nela ocorrem.

Outro ponto importante a ser observado, levantado por FRIZZONE et al. (2005), refere-se aos casos em que o efeito do déficit entre estádios é independente, então se propõe que os modelos aditivos de função de produção sejam mais apropriados (HOWELL e HILER, 1975; STEWART, HAGAN e PRUITT, 1976, proposto por DOORENBOS e KASSAM, 1979). Quando existe dependência entre efeitos dos déficits hídricos ocorridos em diferentes estádios fenológicos, são mais indicados os modelos multiplicativos (JENSEN, 1968; MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN, 1974; CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA, 1986; RAO, SARMA e CHANDER, 1988).

Os subitens apresentados a seguir caracterizam as principais variáveis, que são necessárias para a realização de um balanço hídrico para a cultura da soja, e, ou, estão presentes nos modelos agrometeorológicos voltados à estimativa de sua produtividade.

### 3.5.1 Evapotranspiração

A evapotranspiração potencial ( $ET_p$ ) é a perda de água para a atmosfera, de uma superfície natural, sem restrição hídrica para transpiração e evaporação no solo. A evapotranspiração real ( $ER$ ) é a perda de água de uma superfície natural, em qualquer condição de umidade e cobertura vegetal, sendo um caso especial da  $ET_p$ , pois a

evapotranspiração em sistemas agrícolas não é potencial, devido a variações de umidade e cobertura do solo (PEREIRA, VILLA NOVA e SEDIYAMA, 1997).

DOORENBOS e PRUITT (1975) estabeleceram a grama batatais (*Paspalum notatum* Flugge) como cobertura vegetal padronizada para o solo, e denominaram evapotranspiração potencial ( $ET_p$ ) sob esta condição de *evapotranspiração de referência* ( $ET_o$ ). A literatura apresenta uma série de metodologias para medir ou estimar a  $ET_o$ . Dentre os métodos de estimativa, a equação de Penman-Monteith, parametrizada pela FAO (ALLEN et al., 1998), é um dos modelos mais utilizados e recomendados. Ele assume uma superfície cultivada com grama hipotética com altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica ( $r_s$ ) de  $70 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$  e albedo de 0,23. O método requer medidas de temperatura do ar (máxima e mínima), umidade relativa do ar, radiação solar ou sua estimativa a partir da medida de horas de insolação, e velocidade do vento, tomadas a 2 m de altura ou corrigidas para esse patamar.

A partir da multiplicação da  $ET_o$  por um coeficiente de cultivo ( $kc$ ), obtêm-se a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) que é a quantidade de água utilizada por uma cultura, em qualquer fase de desenvolvimento, sem restrição hídrica (DOORENBOS e PRUITT, 1975; ALLEN et al., 1998; SOUZA, 2001).

### 3.5.2 Precipitação pluvial

A precipitação pluvial representa o retorno da água, na forma líquida, da atmosfera para o solo. A ocorrência de chuva varia de região para região, sendo um fenômeno aleatório a um pequeno prazo, porém cíclico no longo prazo (FRIZZONE et al., 2005).

### 3.5.3 Produtividade potencial ( $Y_p$ )

A produtividade potencial é aquela passível de ser obtida quando todos os fatores manipuláveis do meio estão em nível ótimo. Nessas condições, a produtividade potencial é, diretamente, função dos fatores não-modificáveis do meio. Assim, a manutenção de um ou mais desses fatores modificáveis limitantes faz com que a produtividade potencial da cultura seja determinada pelo mais limitante deles.

### 3.5.4 Fator hídrico em função do estágio fenológico da cultura ( $\lambda$ )

Como já visto, os efeitos do déficit hídrico sobre o rendimento das culturas variam com a espécie e o estágio fenológico em que este ocorre, pois existem estádios da cultura que são mais sensíveis ao déficit que outros (FUNDAÇÃO CARGILL, 1982; CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA, 1986; FRIZZONE et al., 2005; MUNDSTOCK e THOMAS, 2005; EMBRAPA, 2006; STRECK e ALBERTO, 2006).

JENSEN (1968) e MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974) propuseram uma função de produção na qual está presente o índice de sensibilidade ao fator hídrico ( $\lambda$ ). Trata-se de um índice que representa a sensibilidade relativa da planta ao déficit hídrico durante períodos decendiais, mensais ou estádios fenológicos (PICINI, 1998; FRIZZONE et al., 2005).

### 3.5.5 Coeficiente de penalização da produtividade por déficit hídrico ( $k_y$ )

Segundo PICINI (1998) o fator  $ky_i$  (para diferentes estádios fenológicos) e o  $ky$  (para o ciclo todo da cultura), quantificam o efeito do estresse hídrico em estádios específicos de crescimento, para a obtenção empírica da estimativa de produtividade.

Os valores de  $ky$  para a maioria das culturas foram determinados supondo-se que a relação entre o rendimento relativo ( $Y_r/Y_p$ ) e a evapotranspiração relativa ( $ER/ET_c$ ) é linear e válida para déficits hídricos até 50%, ou seja,  $(1 - ER/ET_c) = 0,5$ . Esses valores estão baseados em análise de dados experimentais de campo que abrangem uma ampla faixa de condições de crescimento, de variedades altamente produtivas, bem adaptadas ao ambiente de crescimento e desenvolvidas sob alto nível de manejo (FRIZZONE et al., 2005).

## 3.6 BALANÇO HÍDRICO

Os valores de evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), precipitação pluvial ( $P$ ) e coeficiente de cultivo ( $kc$ ) não entram diretamente como variáveis nos modelos agrometeorológicos, mas são necessários para a realização do balanço hídrico para a cultura da soja, possibilitando a estimativa das evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) e real ( $ER$ ), para cada estágio de desenvolvimento da cultura, que são variáveis diretamente necessárias nos modelos agrometeorológicos para a estimativa da produtividade.

Balanço hídrico é um sistema contábil de água no solo (TUCCI, 1997) e resulta da aplicação do princípio da conservação de massa para a água em um volume de solo (PEREIRA, VILLA NOVA e SEDIYAMA, 1997). Permite observar a dinâmica de água no solo a partir do armazenamento, deficiência e excedentes hídricos (THORNTHWAITE e MATHER, 1955).

O desenvolvimento e a utilização de modelos voltados às atividades agrícolas têm se intensificado nos últimos anos. A literatura tem mostrado que o desenvolvimento e aprimoramento de modelos de simulação de balanço hídrico têm resultado em interessantes ferramentas para estimar alternativas de planejamento, dimensionamento e manejo da irrigação (SOUZA e GOMES, 2008). GOMES (2005), por exemplo, cita e descreve uma relação de, pelo menos, 24 trabalhos que envolveram direta ou indiretamente a realização de balanços hídricos para auxiliar na composição de modelos computacionais, voltados à agricultura irrigada.

PEREIRA, VILLA NOVA e SEDIYAMA (1997) comentam que o monitoramento do armazenamento e das entradas e saídas de água no solo, assim como a definição dos períodos com provável deficiência hídrica, podem ser realizados de forma eficiente aplicando a metodologia proposta por THORNTHWAITE e MATHER (1955). Esta metodologia se baseia na dinâmica do armazenamento de água no solo e ainda pode ser realizada considerando apenas dados climáticos de precipitação e temperatura do ar.

O balanço hídrico climatológico de THORNTHWAITE e MATHER (1955) foi desenvolvido para determinar o regime hídrico de um local, sem a necessidade de medidas diretas das condições do solo. Para sua elaboração, há necessidade de se definir, para uma determinada região ou local a capacidade de água disponível (*CAD*) no solo, os valores de precipitação (*P*) e evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*) para um período considerado. Com essas informações básicas, a metodologia permite estimar, para o mesmo período, o armazenamento da água no solo (*Arm*), a evapotranspiração real (*ER*), deficiência (*Def*) e excedente hídrico (*Exc*) (PEREIRA, VILLA NOVA e SEDIYAMA, 1997).

Baseando-se nos inúmeros exemplos de modelos apresentados na literatura, a metodologia básica apresentada por THORNTHWAITE e MATHER (1955) pode sofrer ajustes e aprimoramentos e, a partir do interesse do pesquisador, permitir o estabelecimento de condições e rotinas para estimar alternativas de planejamento, dimensionamento e manejo da irrigação na agricultura, entre outros, para um determinado período de tempo considerado (SOUZA, 2001; SOUZA, 2005b; SOUZA e GOMES, 2008).

SOUZA (2001) desenvolveu, em linguagem *Visual Basic Application (macros)*, um programa denominado “Modelo para a análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para a cultura do cafeeiro (*MORETTI*)”, possuindo uma série de módulos destinados ao estudo do planejamento de projetos de irrigação de culturas agrícolas. Dentre eles, o módulo “Balanço hídrico climatológico decendial” desenvolvido baseou-se na metodologia de THORNTHWAITE e MATHER (1955), porém contém uma série de adaptações e opções que tratam especialmente da prescrição e quantificação da irrigação suplementar, a fim de atender as necessidades de água no solo para qualquer tipo de cultura (perene ou anual). SOUZA (2005b) desvinculou o módulo balanço hídrico dos demais feitos por SOUZA (2001), e realizou melhorias, dispondo mais três equações de estimativa do armazenamento de água no solo e rotinas estatísticas para permitir melhor interpretação dos dados. Os dois programas possibilitaram o desenvolvimento de diversos trabalhos científicos com resultados satisfatórios quanto à contabilização hídrica das regiões analisadas. No entanto, em função da necessidade de avaliar os componentes do balanço hídrico (*ET<sub>o</sub>*, *ET<sub>c</sub>*, *ER*, *Def* e *Exc*) para diferentes periodicidades e estádios fenológicos de culturas agrícolas, SOUZA (2008) baseando-se em SOUZA (2001) e SOUZA (2005b) desenvolveu um novo programa, denominado “*MORETTI* - Módulo balanço hídrico sequencial (periodicidade: 1, 5, 7, 10, 15 e 30 dias)”, o qual permitiu a realização de análises não contempladas nas duas versões anteriores.

Os modelos de balanço geralmente necessitam de uma série de parâmetros de entrada. O Módulo Balanço Hídrico apresentado por SOUZA (2005b), além dos valores decendias da *ET<sub>o</sub>*, *P* e *kc*, necessita também do valor da capacidade de água disponível (*CAD*), que por sua vez, necessita de uma série de parâmetros físico-hídricos para ser calculada.

Os principais parâmetros físico-hídricos para o cálculo da capacidade de água disponível no solo (*CAD*), são: a capacidade de campo (*CC*), ponto de murcha permanente (*PMP*), densidade aparente ou massa específica do solo ( $\rho_s$ ) e a profundidade efetiva do sistema radicular (*z*).

A capacidade de campo (*CC*) representa o máximo teor de umidade retido no solo sem que haja percolação vertical. Na prática, a *CC* é alcançada com a saturação e drenagem do excesso de água do perfil do solo. Em solos permeáveis de textura média, a condição de *CC* ocorre aproximadamente dois a três dias após uma chuva ou irrigação (SOUZA, 2001).

Ponto de murcha permanente (*PMP*) é o limite mínimo de umidade no solo em que as plantas se mantêm murchas e não retornam a turgidez quando restabelecida a condição hídrica favorável à sobrevivência das mesmas (VEIHMAYER e HENDRICKSON, 1949; TAIZ e ZEIGER, 2004).

A estimativa da *CC* e do *PMP* pode ser obtida por meio de funções de pedotransferência, as quais não apresentam a mesma precisão de resultados de medição, porém constituem uma alternativa simplificada, rápida e barata para a solução de problemas hidrológicos (GOMES, 2005). O modelo de VAN GENUNCHTEN (1980) descreve acuradamente tanto o ramo de perda como de ganho de água da curva de retenção de água no solo, sendo particularmente importante para predição da condutividade hidráulica em solos insaturados.

A partir de funções de pedotransferência, o programa *SPLINTEX* (PREVEDELLO, 1999) determina parâmetros que compõem o modelo de VAN GENUNCHTEN (1980), tornando possível o cálculo da *CC* e *PMP*. Este programa assume que a curva de distribuição acumulada das classes de textura tem a mesma forma da curva de retenção de água no solo. Com isso, é possível transladar uma curva na outra utilizando a função *spline* cúbica e o algoritmo de ARYA e PARIS (1981). Contudo, como a curva de retenção é determinada pelo tamanho e distribuição de poros e não pelo tamanho e distribuição de partículas, alguns desvios podem ocorrer, os quais podem ser eliminados: (a) caso o usuário possua ao menos um ponto experimental da curva de retenção; ou (b) corrigidos automaticamente pelo programa, com base nas recomendações de ARRUDA, ZULLO JÚNIOR e OLIVEIRA (1987).

Densidade aparente ou massa específica do solo ( $\rho_s$ ) é a relação entre a massa de uma amostra de solo seco a 110 °C e o volume dessa amostra não deformada, incluindo os espaços ocupados pelo ar e pela água. Também conhecida como densidade do solo, densidade global ou massa específica do solo, geralmente é expressa em  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (CRUZ et al., 2006).

Profundidade efetiva do sistema radicular (*z*) é considerada a profundidade do solo onde se concentra o maior volume de raízes, cerca de 80% destas. Seu valor é particularmente útil para a determinação da lâmina de água no solo que pode estar disponível às plantas (BERNARDO, 1989; CRUZ et al., 2006).

A capacidade de água disponível no solo (*CAD*) compreende a porção de água presente no solo entre a capacidade de campo (*CC*) e o ponto de murcha permanente (*PMP*).



No entanto, apenas uma fração ( $p$ ) da  $CAD$  pode ser considerada como disponível ( $AD$ ), uma vez que, à medida que o solo perde umidade, a tensão necessária para extrair-se mais água de seu interior torna-se cada vez maior. A fração  $p$  é intrínseca a planta, pois corresponde a capacidade que esta tem de retirar água do solo antes que se configure um déficit hídrico na mesma (BERNARDO, 1989; PEREIRA, VILLA NOVA e SEDIYAMA, 1997; ALLEN et al., 1998).

Até que a fração  $p$  da  $CAD$  seja utilizada, admite-se que não haja redução significativa na produtividade da cultura. Neste contexto, define-se deficiência hídrica quando o armazenamento de água no solo está abaixo da água disponível (BERNARDO, 1989).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho de pesquisa foi desenvolvido a partir das seguintes etapas:

- **Primeira etapa:** Levantamento dos parâmetros necessários ao processo de cálculo dos modelos agrometeorológicos para a cultura da soja, tais como parâmetros físico-hídricos do solo, precipitação e demais dados climáticos para o cálculo da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), e realização do balanço hídrico para estimativa da evapotranspiração real ( $ER$ ) e deficiência ( $Def$ );
- **Segunda etapa:** Avaliação da precisão da estimativa da produtividade da cultura da soja a partir de cinco modelos simplificados e sete modelos específicos (agrometeorológicos), para a região de Ponta Grossa, sob diferentes sistemas de manejo, considerando uma série de parâmetros estatísticos, bem como análise de regressão e correlação realizada entre os valores, medidos e estimados, de produtividade;
- **Terceira etapa:** Ajuste dos coeficientes  $k_y$ ,  $k_{y_i}$  e  $\lambda$  presentes em seis dos sete modelos agrometeorológicos estudados, para a cultura da soja, na região de Ponta Grossa, por meio da realização de transformadas logarítmicas e regressões múltiplas. Reavaliação da precisão de estimativa da produtividade dos sete modelos agrometeorológicos, conforme disposto na **Segunda etapa**.

### 4.1 MODELOS UTILIZADOS PARA ESTIMAR A PRODUTIVIDADE

As análises de regressão e correlação visando verificar o ajustamento da produtividade real com dados climáticos ( $ET_o$ ,  $ET_c$ ,  $ER$ ,  $ER/ET_c$  e  $P$ ) foram realizadas a partir das equações linear, potencial, exponencial, logarítmica e polinomial de segundo grau, com o auxílio de uma planilha eletrônica.

Em função das recomendações e sugestões apontadas por MORAES et al. (1998), PICCINI (1998) e FRIZZONE et al. (2005), os modelos agrometeorológicos presentes na Tabela 4.1 foram selecionados para analisar e estimar a produtividade da soja.

**TABELA 4.1** – Relação dos modelos utilizados no trabalho, com as respectivas funções matemáticas e variáveis independentes.

Identificação	Modelo	Função*	Variáveis independentes
01	HOWELL e HILER (1975)	$\frac{Y_r}{Y_p} = \frac{\sum_{i=1}^n (ER)_i}{\sum_{i=1}^n (ET_c)_i}$	$\frac{ER}{ET_c}$
02	JENSEN (1968)	$\frac{Y_r}{Y_p} = \prod_{i=1}^n \left( \frac{ER}{ET_c} \right)_i^{\lambda_i}$	$\frac{ER}{ET_c}$
03	MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974)	$\frac{Y_r}{Y_p} = \prod_{i=1}^n \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER}{ET_c} \right)_i^2 \right]^{\lambda_i}$	$\frac{ER}{ET_c}$
04	DOORENBOS e KASSAN (1979)	$\frac{Y_r}{Y_p} = 1 - \left[ ky \cdot \left( 1 - \frac{ER}{ET_c} \right) \right]$	$\frac{ER}{ET_c}$
05	STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979)	$\frac{Y_r}{Y_p} = 1 - \left[ \sum_{i=1}^n ky_i \cdot \left( 1 - \frac{ER}{ET_c} \right)_i \right]$	$\frac{ER}{ET_c}$
06	DOORENBOS e KASSAN (1979) modificado por CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA (1986)	$\frac{Y_r}{Y_p} = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - ky_i \cdot \left( 1 - \frac{ER}{ET_c} \right)_i \cdot [1 - ke \cdot (1 - fe_i)] \right\}$	$\frac{ER}{ET_c}$
07	RAO, SARMA e CHANDER (1988)	$\frac{Y_r}{Y_p} = \prod_{i=1}^n \left[ 1 - ky_i \cdot \left( 1 - \frac{ER}{ET_c} \right)_i \right]$	$\frac{ER}{ET_c}$

\* A simbologia e unidade das equações podem ser verificadas nos subitens a seguir

## 4.2 LOCAL DE REALIZAÇÃO DAS ANÁLISES

As estimativas de produtividade, bem como a avaliação dos modelos agrometeorológicos, foram realizadas em solos sob cultivo de soja, pertencentes a um experimento de longa duração em sistemas de manejo do solo, conduzido na Estação Experimental da Fundação ABC, situada no município de Ponta Grossa - Paraná, Brasil. Os dados reais de produtividade da cultura da soja foram registrados entre as safras de 1990 a 2006/07, totalizando 11 ciclos produtivos para a soja, devido ao esquema de rotação de culturas apresentado na Tabela 4.2.

**TABELA 4.2** – Esquema de rotação de culturas realizado na Estação Experimental da Fundação ABC, Ponta Grossa-PR.

Ano	Safr			
	Inverno	Denominação	Verão	Denominação
1990	tremoço	1990	milho	1990/91
1991	aveia branca	1991	soja	1991/92
1992	trigo	1992	soja	1992/93
1993	ervilhaca	1993	milho	1993/94
1994	aveia branca	1994	soja	1994/95
1995	trigo	1995	soja	1995/96
1996	ervilhaca	1996	milho	1996/97
1997	aveia branca	1997	soja	1997/98
1998	trigo	1998	soja	1998/99
1999	aveia preta	1999	milho	1999/2000
2000	aveia branca	2000	soja	2000/01
2001	trigo	2001	soja	2001/02
2002	aveia preta	2002	milho	2002/03
2003	aveia preta	2003	soja	2003/04
2004	trigo	2004	soja	2004/05
2005	aveia preta	2005	milho	2005/06
2006	aveia branca	2006	soja	2006/07

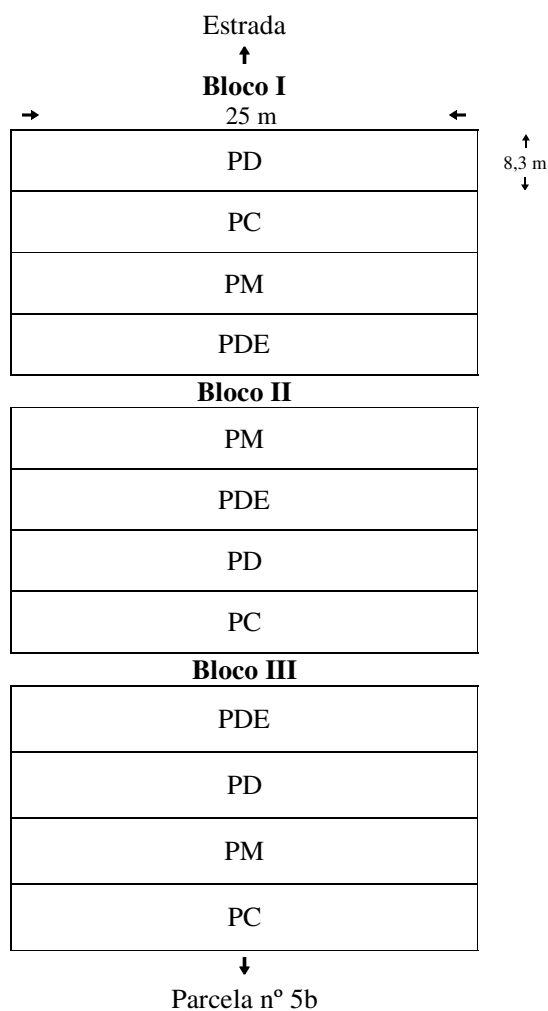
Fonte: Fundação ABC (2007).

O solo corresponde a um Latossolo Vermelho distrófico típico (Typic Hapludox), textura argilosa, profundo, muito bem drenado e estruturado, sem impedimentos físicos, derivado de material retrabalhado de arenitos da formação Furnas e folhelhos da formação Ponta Grossa do período devoniano. O relevo da região é suave ondulado e a vegetação nativa é denominada Campos Gerais.

As análises do solo foram realizadas na Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Laboratório de Física do Solo. As análises dos modelos foram realizadas no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA)/DSEA/SCA/UFPR.

#### 4.2.1 Área experimental utilizada

A Figura 4.1 apresenta um esquema da área experimental implantada na Fundação ABC, onde a cultura da soja foi cultivada sob diferentes sistemas de manejo: PD - plantio direto; PC - plantio convencional com uma aração e duas gradagens; PM - preparo mínimo com duas gradagens; PDE - plantio direto com uma escarificação a cada três anos, realizada durante o inverno, visando atingir a profundidade de 30 cm.



**FIGURA 4.1**– Esquema da área experimental, contendo a cultura da soja nos diferentes sistemas de manejo: PD - plantio direto; PC - plantio convencional com uma aração e duas gradagens; PM - preparo mínimo com duas gradagens; PDE - plantio direto com uma escarificação a cada três anos (Fonte: Fundação ABC/Ponta Grossa).

### 4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS VARIÁVEIS, COEFICIENTES OU FATORES

Os modelos agrometeorológicos utilizados para realizar a estimativa da produtividade possuem uma série de variáveis, coeficientes ou fatores. As principais são: produtividade potencial ( $Y_p$ ), evapotranspiração real ( $ER$ ), evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ), fatores hídricos em função do estágio fenológico da cultura ( $\lambda$ ), fator excedente ( $fe$ ), e os coeficientes de penalização da produtividade por déficit ( $k_y$ ) e excedente ( $ke$ ) hídrico.

Os subitens dispostos a seguir fazem algumas considerações sobre os procedimentos realizados para a obtenção das principais variáveis, fatores ou coeficientes.

#### 4.3.1 Produtividade potencial ( $Y_p$ )

O histórico das produtividades de soja na safra normal ( $Y_r$ ), como também a produtividade máxima histórica registrada, denominada produtividade potencial ( $Y_p$ ), foram obtidas a partir de um levantamento junto a Estação Experimental da Fundação ABC. Para o presente estudo foi considerado a média geral da produtividade de três blocos para cada sistema de manejo analisado, as quais são apresentadas na Tabela 4.3.

**TABELA 4.3** – Histórico das médias das produtividades de soja na safra normal, obtidas na Estação Experimental da Fundação ABC, Ponta Grossa-PR.

Safra	Cultivar	Semeadura	Colheita	Produtividade			
				----- kg·ha <sup>-1</sup> -----			
				PD	PC	PM	PDE
1991/92	BR 16	18/11/91	—	3971	3720	4289	4294
1992/93	BR 16	24/11/92	—	3283	3610	3553	3814
1994/95	BR 16	11/11/94	03/04/95	3613	3599	3644	3664
1995/96	BR 16	22/11/95	08/04/96	3561	3205	3435	3349
1997/98	BR 16	24/10/97	19/03/98	3177	3425	3319	3096
1998/99	BR 16	05/11/98	01/04/99	2931	3454	3389	3106
2000/01	BRS 133	29/11/00	12/04/01	3872	3939	3855	3829
2001/02	BRS 133	01/11/01	11/04/02	3207	3094	3214	2907
2003/04	CD 206	06/11/03	08/04/04	3745	3567	3759	3453
2004/05	CD 206	10/11/04	06/04/05	3332	3153	3164	3188
2006/07	CD 206	27/11/06	04/04/07	4365	4267	4257	4302

Fonte: Fundação ABC (2007).

A fim de comparar as médias das produtividades reais entre os sistemas de manejo estudados, realizou-se a análise estatística (ANOVA) considerando o delineamento

inteiramente casualizado (STEEL e TORRIE, 1980), sendo o tratamento constituído pelos sistemas de manejo (Plantio Direto, Plantio Convencional, Preparo Mínimo e Plantio Direto Escarificado), considerando 11 repetições para cada tratamento. Esta análise foi realizada com o auxílio do programa estatístico SOC (EMBRAPA, 1990).

#### 4.3.2 Evapotranspiração real ( $ER$ )

A estimativa da evapotranspiração real ( $ER$ ) foi realizada com auxílio de um programa denominado “*MORETTI* – Módulo: Balanço hídrico seqüencial (Periodicidade: 1, 5, 7, 10 15 e 30 dias), Versão 1.0” (SOUZA, 2008), que foi extraído e melhorado a partir do modelo original realizado por SOUZA (2001) – Modelo para a análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para a cultura do cafeeiro (*MORETTI*), e SOUZA (2005b) – *MORETTI* – Módulo: Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista, Versão 2.0. A  $ER$  da cultura da soja nas 11 safras foi contabilizada no balanço hídrico utilizando a periodicidade diária.

#### 4.3.3 Precipitação pluvial ( $P$ ) e evapotranspiração de referência ( $ET_o$ )

Os valores diários de  $P$  e  $ET_o$  foram necessários para a realização do balanço hídrico e possibilitaram a estimativa de parâmetros como a  $ER$  e  $ET_c$ . Como a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) não é medida nas estações do SIMEPAR, esta variável foi estimada a partir do método de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (ALLEN et al., 1998).

Os dados diários de precipitação e demais dados meteorológicos para a estimativa da  $ET_o$  da região de Ponta Grossa, tais como: as temperaturas máxima ( $T_{max}$ ), média ( $T_{med}$ ) e mínima ( $T_{min}$ ) diárias; velocidade ( $U_z$ ) e altura ( $z$ ) da medida da velocidade do vento; e o número de horas de insolação observada ( $n$ ); foram solicitados ao Instituto Meteorológico do Paraná (SIMEPAR). A antiga localização da estação climatológica convencional de Ponta Grossa era no Parque Estadual de Vila Velha, sob latitude 25,2381° S, longitude 50,0213° W, altitude 801 m, e clima Cfb, segundo a classificação de Köppen. Esta estação foi desativada em 30 de junho de 2002, quando a nova estação climatológica automática do Campo demonstrativo e experimental de Ponta Grossa - Fundação ABC, sob latitude 25,0137° S, longitude 50,1524° W, altitude 882 m e clima Cfb, segundo a classificação de Köppen, passou a ser a responsável pela coleta dos dados climáticos da região.

A estimativa da  $ET_o$  ( $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ ) pelo método de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO (ALLEN et al., 1998) é dado por:

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma_{\text{psy}} \cdot \frac{900}{(T + 273)} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma_{\text{psy}} \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (08)$$

Sendo:  $ET_o$  – evapotranspiração de referência ( $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ );  $\Delta$  – corresponde a declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar ( $\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ );  $R_n$  – radiação líquida na superfície ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ );  $G$  – balanço do fluxo de calor no solo ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ );  $\gamma_{\text{psy}}$  – constante psicrométrica ( $\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ );  $T$  – temperatura média do ar ( $^\circ\text{C}$ );  $u_2$  – velocidade do vento a dois metros de altura ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $e_s$  – pressão de saturação de vapor ( $\text{kPa}$ );  $e_a$  – pressão atual do vapor ( $\text{kPa}$ ).

A constante psicrométrica ( $\gamma_{\text{psy}}$ ) foi obtida por meio da seguinte equação:

$$\gamma_{\text{psy}} = a_{\text{psy}} \cdot P \quad (09)$$

Sendo:  $\gamma_{\text{psy}}$  – constante psicrométrica ( $\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ );  $a_{\text{psy}}$  – coeficiente dependente do tipo de ventilação do bulbo úmido ( $a_{\text{psy}} = 0,0008 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  para psicrômetros de ventilação natural);  $P$  – pressão atmosférica ( $\text{kPa}$ ).

A determinação da pressão atmosférica ( $P$ ) partiu de uma simplificação da lei do gás ideal, assumindo a temperatura de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  para atmosfera padrão:

$$P = 101,3 \cdot \left( \frac{293 - 0,0065 \cdot Z}{293} \right)^{5,26} \quad (10)$$

Sendo:  $P$  – pressão atmosférica ( $\text{kPa}$ );  $Z$  – altitude ( $\text{m}$ ).

O cálculo da pressão de vapor ( $e_s$ ) foi realizado utilizando-se a seguinte equação:

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{\text{max}}) + e^\circ(T_{\text{min}})}{2} \quad (11)$$

Sendo:  $e_s$  – pressão de saturação do vapor ( $\text{kPa}$ );  $e^\circ(T_{\text{max}})$  – pressão de saturação do vapor com base na temperatura máxima diária do ar ( $\text{kPa}$ );  $e^\circ(T_{\text{min}})$  – pressão de saturação do vapor com base na temperatura mínima diária do ar ( $\text{kPa}$ ).

A pressão de saturação do vapor a uma temperatura “ $T$ ” do ar [ $e^\circ(T)$ ] foi obtida por meio da seguinte equação:



$$e^o(T) = 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3}\right) \quad (12)$$

Sendo:  $e^o(T)$  – pressão de saturação do vapor a uma temperatura “ $T$ ” do ar (kPa);  $T$  – temperatura do ar (°C);  $\exp(\dots)$  – base do logaritmo neperiano (2,7183) elevada a potência (...).

A declinação da curva de pressão de saturação do vapor ( $\Delta$ ) foi obtida por meio da seguinte relação:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e^o(T_{med})}{(T_{med} + 237,3)^2} \quad (13)$$

Sendo:  $\Delta$  – declinação da curva de pressão de saturação do vapor (kPa·°C<sup>-1</sup>);  $e^o(T_{med})$  – pressão de saturação do vapor com base na temperatura média diária do ar (kPa);  $T_{med}$  – temperatura média diária do ar (°C).

A pressão atual do vapor ( $e_a$ ) foi determinada a partir de dados diários de umidade relativa média do ar. Abaixo é apresentada a equação utilizada:

$$e_a = \frac{UR_{med}}{100} \cdot \left[ \frac{e^o(T_{máx}) + e^o(T_{mín})}{2} \right] \quad (14)$$

Sendo:  $e_a$  – pressão atual do vapor (kPa);  $UR_{med}$  – umidade relativa média diária do ar (adimensional);  $e^o(T_{máx})$  – pressão de saturação do vapor com base na temperatura máxima diária do ar (kPa);  $e^o(T_{mín})$  – pressão de saturação do vapor com base na temperatura mínima diária do ar (kPa).

Conhecendo-se o valor de  $e_a$ , foi possível obter a temperatura do ponto de orvalho ( $T_{dew}$ ) por meio da inversão da equação de Tétens, isolando  $T_{dew}$  e com isso obtendo a seguinte equação:

$$T_{dew} = \frac{237,3 \cdot \ln e_a + 116,9889}{16,777 - \ln e_a} \quad (15)$$

Sendo:  $T_{dew}$  – temperatura do ponto de orvalho do ar (°C);  $e_a$  – pressão atual do vapor (kPa).

O Anexo A apresenta passo a passo a inversão da equação de Tétens para obtenção de  $T_{dew}$ .

A radiação solar no topo da atmosfera ( $R_a$ ) para períodos diários foi estimada por meio da seguinte equação:

$$R_a = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot [\omega_s \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s)] \quad (16)$$

Sendo:  $R_a$  – radiação solar no topo da atmosfera ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ );  $G_{sc}$  – constante solar = 0,0820 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ );  $d_r$  – distância relativa Terra-Sol (adimensional);  $\omega_s$  – ângulo horário correspondente ao pôr do Sol (radianos);  $\varphi$  – latitude (radianos);  $\delta$  – declinação solar (radianos).

Como a latitude obtida estava expressa em graus, a sua conversão para radianos foi realizada utilizando-se a seguinte equação:

$$\text{Radianos} = \frac{\pi}{180} \text{ graus} \quad (17)$$

A distância relativa Terra-Sol ( $d_r$ ) e a declinação solar ( $\delta$ ) foram obtidas por:

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right) \quad (18)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (19)$$

Sendo:  $d_r$  – distância relativa Terra-Sol (adimensional);  $\delta$  – declinação solar (radianos);  $J$  – dia juliano.

O ângulo horário correspondente ao pôr do Sol ( $\omega_s$ ) foi obtido por:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad (20)$$

Sendo:  $\omega_s$  – ângulo horário correspondente ao pôr do Sol (radianos);  $\varphi$  – latitude (radianos);  $\delta$  – declinação solar (radianos).

A duração máxima teórica do dia ( $N$ ) foi obtida por meio da seguinte equação:

$$N = \frac{24}{\pi} \cdot \omega_s \quad (21)$$

Sendo:  $N$  – duração máxima teórica do dia (horas);  $\omega_s$  – ângulo horário correspondente ao pôr do Sol (radianos).

A radiação solar incidente ( $R_s$ ) não foi medida, portanto foi calculada pela seguinte equação:

$$R_s = \left( a_s + b_s \cdot \frac{n}{N} \right) \cdot R_a \quad (22)$$

Sendo:  $R_s$  – radiação solar incidente ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ );  $n$  – insolação observada (horas);  $N$  – duração máxima teórica do dia (horas);  $n/N$  – razão de insolação (adimensional);  $R_a$  – radiação solar no topo da atmosfera ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ );  $a_s$  – constante de regressão que expressa a fração da radiação extraterrestre que atinge a Terra em dias nublados (adimensional);  $a_s + b_s$  – fração da radiação extraterrestre que atinge a Terra em dias sem nuvens (adimensional).

Para localidades onde a radiação solar não foi avaliada e/ou a calibração dos parâmetros não está sendo realizada, a FAO (ALLEN et al., 1998) recomenda os valores  $a_s = 0,25$  e  $b_s = 0,50$ .

Como os valores de  $a_s$  e  $b_s$  não estavam disponíveis, a radiação solar em céu sem nuvens ( $R_{so}$ ) foi calculada por meio da seguinte expressão:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} Z) \cdot R_a \quad (23)$$

Sendo:  $R_{so}$  – radiação solar em céu sem nuvens ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ );  $Z$  – altitude do local (m);  $R_a$  – radiação solar no topo da atmosfera ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ).

O saldo de radiação de ondas curtas ( $R_{ns}$ ) foi calculado por meio da seguinte expressão:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s \quad (24)$$

Sendo:  $R_{ns}$  – saldo de radiação de ondas curtas ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ );  $\alpha$  – albedo ou coeficiente de reflexão da cultura hipotética ( $\alpha = 0,23$ );  $R_s$  – radiação solar incidente ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ).

Assumindo que outros materiais como o  $\text{CO}_2$  e a poeira, os quais absorvem e emitem ondas longas estão em concentração constante, a equação utilizada para aferir o saldo de radiação de ondas longas ( $R_{nl}$ ) foi a seguinte:

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left[ \frac{(T_{max})^4 + (T_{min})^4}{2} \right] \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot \left( 1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (25)$$

Sendo:  $R_{nl}$  – saldo de radiação de ondas longas ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ );  $\sigma$  – constante de Stefan-Boltzmann ( $4,903 \text{ MJ} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ );  $T_{max}$  – temperatura máxima absoluta registrada no período de 24 horas (K);  $T_{min}$  – temperatura mínima absoluta registrada no período de 24 horas (K);  $e_a$  – pressão atual do vapor (kPa);  $R_s/R_{so}$  – radiação relativa de ondas curtas (limitada para  $\leq 1,0$ );  $R_s$  – radiação solar incidente ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ );  $R_{so}$  – radiação solar em céu sem nuvens ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ).

O saldo de radiação ( $R_n$ ) foi obtido pela seguinte equação:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (26)$$

Sendo:  $R_n$  – saldo de radiação ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ );  $R_{ns}$  – saldo de radiação de ondas curtas ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ );  $R_{nl}$  – saldo de radiação de ondas longas ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ).

A FAO (ALLEN et al., 1998) considera o fluxo de calor no solo ( $G$ ) igual a zero para períodos diários. No entanto, PEREIRA, VILLA NOVA e SEDIYAMA (1997) afirmam que se a temperatura média dos três dias anteriores ( $T_{-3d}$ ) estiver disponível, então é possível calcular  $G$  por meio da relação empírica:

$$G = 0,38 \cdot (T_d - T_{-3d}) \quad (27)$$

Sendo:  $G$  – fluxo de calor no solo ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ );  $T_d$  – temperatura média do dia ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{-3d}$  – temperatura média dos três dias anteriores ( $^{\circ}\text{C}$ ).

A velocidade do vento obtida na estação meteorológica foi submetida a seguinte equação a fim de ajustá-la a uma altura de 2 m:

$$u_2 = u_z \cdot \frac{4,87}{\ln(67,8 \cdot z - 5,42)} \quad (28)$$

Sendo:  $u_2$  – velocidade do vento a 2 m de altura ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $u_z$  – velocidade do vento medida “ $z$ ” metros acima da superfície do solo ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $z$  – altura da medida da velocidade do vento (m).

A partir da inserção destas componentes do modelo de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) em uma planilha eletrônica, foi possível a obtenção da  $ET_o$  diária da região de Ponta Grossa-PR para o período estudado.

#### 4.3.4 Evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ )

Os valores de evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) foram obtidos a partir da equação:

$$ET_c = ET_o \cdot kc \quad (29)$$

Sendo:  $ET_c$  – a evapotranspiração da cultura ( $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ );  $ET_o$  – evapotranspiração de referência ( $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ );  $kc$  – coeficiente de cultivo (adimensional).

Os valores dos coeficientes de cultivo ( $kc$ ) utilizados para transformar a  $ET_o$  em  $ET_c$  são os apresentados por FARIAS et al. (2001), cujos períodos foram adaptados aos estádios fenológicos propostos por COSTA (1996) (Tabela 4.4).

**TABELA 4.4** – Duração dos estádios fenológicos dos cultivares da cultura da soja, com diferentes ciclos e seus respectivos coeficientes de cultivo ( $kc$ ), sugeridos por COSTA (1996) e FARIAS et al. (2001), respectivamente.

Ciclo Dias	Estádios fenológicos			
	S-V1/V2	V2-R1	R1-R6/R7	R7-R9
110	10	35	35	30
115	10	35	40	30
120	15	35	40	30
130	15	40	45	30
135	15	40	50	30
140	15	45	50	30
<b>Kc</b>	0,56	1,21	1,50	0,90

S: semeadura; V1: folhas primárias desenvolvidas; V2: folha trifoliada desenvolvida no nó acima das folhas primárias; R1: início da floração; R6: grãos com 3 mm num dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida; R7: legume contendo, ao menos, um grão verde que ocupa toda a sua cavidade, em um dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida; R9: 95% dos legumes atingiram a cor de legume maduro do referido cultivar, segundo COSTA (1996).

Como todos os cultivares utilizados no presente estudo possuíam um ciclo médio de 140 dias (Tabela 4.4), os valores de  $kc$  foram ajustados para este período.

#### 4.3.5 Parâmetros físico-hídricos para o armazenamento de água no solo

O programa “*MORETTI* – Módulo: Balanço hídrico seqüencial (Periodicidade: 1, 5, 7, 10 15 e 30 dias), Versão 1.0”, como todo programa, necessita de dados de entrada para realizar os cálculos. A versão trabalhada necessita, em função da periodicidade, dos dados de precipitação pluvial ( $P$ ),  $ET_o$ ,  $kc$ ,  $CAD$  e fração de água disponível no solo para um determinado tipo de cultura ( $p$ ).

A  $CAD$  foi obtida por meio da seguinte equação:

$$CAD_i = 0,01 \cdot (U_{CC} - U_{PMP}) \cdot z_i \cdot \rho_s \quad (30)$$

Sendo:  $CAD_i$  – capacidade de água disponível no solo no  $i$ -ésimo estágio fenológico (mm);  $U_{CC}$  – umidade do solo na capacidade de campo com base em peso (%);  $U_{PMP}$  – umidade do solo no ponto de murcha permanente com base em peso (%);  $z_i$  – profundidade efetiva do sistema radicular no  $i$ -ésimo estágio fenológico (mm);  $\rho_s$  – massa específica do solo ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ).

A FAO (ALLEN et al., 1998) também apresenta valores típicos de fração  $p$  para diversas culturas, indicando o valor de 0,5 para a cultura da soja, com o qual foi possível calcular a água disponível do solo por meio da seguinte equação:

$$AD_i = CAD_i \cdot p \quad (31)$$

Sendo:  $AD_i$  – água disponível no solo no  $i$ -ésimo estágio fenológico (mm);  $CAD_i$  – capacidade de água disponível do solo no  $i$ -ésimo estágio fenológico (mm);  $p$  – fração de água disponível no solo para um determinado tipo de cultura (adimensional).

Conforme recomendação de SOUZA e GOMES (2008), a estimativa do armazenamento de água no solo e/ou “negativo acumulado”, para o cálculo do balanço hídrico diário, nas 11 safras analisados, foi realizado utilizando a opção “Equação Cosenoidal”, disponível no programa desenvolvido por SOUZA (2008), que realiza os cálculos a partir das seguintes condições:

– Quando  $CAD \cdot (1 - p) < ARM \leq CAD$ , ou seja, na zona úmida,

$$ARM = CAD - L \quad (32)$$

– Quando  $0 < ARM \leq CAD \cdot (1 - p)$ , ou seja, na zona seca,

$$ARM = (1 - p) \cdot CAD \cdot \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{|L| - CAD \cdot p}{(1 - p) \cdot CAD} \right) \right] \right\} \quad (33)$$

Sendo:  $CAD$  – a capacidade de água disponível (mm);  $ARM$  – o armazenamento de água do solo (mm);  $L$  – o valor do negativo acumulado no decêndio (mm);  $p$  – a fração água disponível no solo para uma determinada cultura (adimensional).

O cálculo da capacidade de água disponível no solo ( $CAD$ ) necessita de dados referentes ao solo, tais como capacidade de campo ( $CC$ ), ponto de murcha permanente ( $PMP$ ), massa específica ( $\rho_s$ ) e profundidade efetiva do sistema radicular ( $z$ ). Desta forma, os parágrafos a seguir apresentam alguns procedimentos utilizados para a determinação destes parâmetros.

As coletas de amostras do solo e análises laboratoriais foram realizadas segundo metodologias descritas por EMBRAPA (1997). Foram utilizadas as seguintes metodologias: anel volumétrico, para obtenção da massa específica do solo ( $\rho_s$ ); mesa de tensão, para obter um ponto da curva de retenção da água no solo ( $\theta_{su}$ ); e, densímetro, para granulometria. Todos os procedimentos estão detalhados no Anexo B (ponto da curva de retenção da água no solo –  $\theta_{su}$  e massa específica do solo –  $\rho_s$ ) e Anexo C (granulometria).

A determinação da capacidade de campo (*CC*) e do ponto de murcha permanente do solo (*PMP*), com base em volume, foi realizada por meio do modelo de VAN GENUNCHTEN (1980).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha \cdot h)^n\right]^m} \quad (34)$$

Sendo:  $\theta$  – umidade do solo com base em volume ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $\theta_s$  – umidade de saturação do solo com base em volume ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $\theta_r$  – umidade residual do solo com base em volume ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $h$  – altura da coluna de água que exerce pressão (cm);  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$  – parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo (adimensionais).

As estimativas da umidade de saturação ( $\theta_s$ ) e residual ( $\theta_r$ ) com base em volume, bem como dos parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo ( $\alpha$ ,  $n$  e  $m$ ), foram realizadas por meio do programa *SPLINTEX* versão 1.0, desenvolvido por PREVEDELLO (1999). Para tanto, este programa necessita de uma série de dados de entrada, tais como: tamanho das frações granulométricas do solo aferidas (areia, silte, argila, entre outros) e suas respectivas porcentagens acumuladas; massa específica do solo ( $\rho_s$ ); massa específica de partícula ( $\rho_p$ ), e, caso o usuário tenha em mãos os valores da umidade com base em volume e da altura da coluna de água para obtenção desta umidade, também é possível a inserção destes dados.

A equação a seguir exemplifica a obtenção da umidade com base em volume a partir de dados experimentais:

$$\theta_{su} = \frac{(m_{su} - m_{ss})}{V_{i.a.}} \cdot 100 \quad (35)$$

Sendo:  $\theta_{su}$  – umidade do solo com base em volume ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $m_{su}$  – massa do solo úmido (g);  $m_{ss}$  – massa do solo seco em estufa a 105 °C (g);  $V_{i.a.}$  – volume interno do anel ou volume natural ( $\text{cm}^3$ ).

A diferença entre a massa de solo úmido e a massa de solo seco resulta na massa de água que estava presente no solo, então a unidade de massa (g) pode ser substituída pela volumétrica ( $\text{cm}^3$ ), visto que a água apresenta massa específica igual a 1  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

A partir da obtenção experimental do ponto da curva de retenção da água no solo ( $\theta_{su}$ ),  $\rho_a$  e granulometria, foi possível a inserção destes dados no programa *SPLINTEX*. Adotou-se o valor de 2,65  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  para massa específica de partícula ( $\rho_p$ ), segundo recomendação de KIEHL (1979), e uma altura da coluna de água ( $h$ ) de 100 cm e 15.000 cm, para o cálculo da

CC e do PMP, respectivamente, segundo recomendação de PREVEDELLO (1996) e TAIZ e ZEIGER (2004).

Os resultados da análise granulométrica e os valores de  $\rho_s$ ,  $\theta_{CC}$ ,  $\theta_{PMP}$  estão apresentados na Tabela 4.5.

**TABELA 4.5** – Porcentagem das frações granulométricas e parâmetros físicos do solo, na profundidade entre 0-15 cm, para cada sistema de manejo adotado pela Fundação ABC, Ponta Grossa-PR.

Manejo	Bloco	Frações Granulométricas			Parâmetros Físicos		
		Areia	Silte	Argila	$\rho_s$	$\theta_{CC}^*$	$\theta_{PMP}^*$
		----- % -----			g·cm <sup>-3</sup>	----- % -----	
Plantio Direto	I	33,6	35,0	31,4	1,16	35,04	19,04
	II	36,8	27,7	35,4	1,02	38,95	22,74
	III	34,8	31,9	33,3	1,04	40,46	21,45
Plantio Convencional	I	32,9	37,1	30,0	1,15	35,61	18,50
	II	33,2	35,5	31,3	1,03	36,94	20,65
	III	34,8	35,8	29,4	1,06	35,34	19,16
Preparo Mínimo	I	34,0	36,0	30,0	1,18	36,77	18,01
	II	33,0	30,8	36,3	1,10	33,48	22,30
	III	35,7	32,7	31,7	1,04	35,57	20,53
Plantio Direto Escarificado	I	33,8	32,0	34,2	1,14	34,27	20,62
	II	32,4	34,7	32,9	1,11	34,25	20,56
	III	40,4	28,8	30,8	0,96	35,81	20,67

\*Valores dos parâmetros físico-hídricos do solo com base em volume (cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>)

De acordo com a FIETZ e URCHEI (2002), a profundidade efetiva das raízes da cultura da soja varia ao longo de seu desenvolvimento, conforme está apresentado na Tabela 4.6.

**TABELA 4.6** – Profundidade efetiva do sistema radicular da cultura da soja (z) nos seus diversos estádios fenológicos, sugeridos por FIETZ e URCHEI (2002) e COSTA (1996), respectivamente.

Estádios fenológicos	Ciclo	Profundidade (z)
	----- dias -----	----- cm -----
S-V1/V2	15	15
V2-R1	45	30
R1-R6/R7	50	40
R7-R9	30	40

S: semeadura; V1: folhas primárias desenvolvidas; V2: folha trifoliada desenvolvida no nó acima das folhas primárias; R1: início da floração; R6: grãos com 3 mm em um dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida; R7: legume contendo, ao menos, um grão verde que ocupa toda a sua cavidade, em um dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida; R9: 95% dos legumes atingiram a cor de legume maduro do referido cultivar, segundo COSTA (1996); z: profundidade efetiva do sistema radicular.



Desta forma, os valores de *CAD* para cada sistema de manejo foram determinados considerando os parâmetros dispostos anteriormente e estão apresentados na Tabela 4.7.

**TABELA 4.7** – Capacidade de água disponível no solo (*CAD*) para a cultura da soja, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo, na Estação Experimental da Fundação ABC, Ponta Grossa-PR.

Estádios fenológicos	Profundidade cm	----- <i>CAD</i> -----			
		Bloco I	Bloco II	Bloco III	Média
Plantio Direto					
I	15	24,0	24,4	28,5	25,6
II	30	48,0	48,7	57,0	51,3
III	40	64,0	65,0	76,0	68,3
IV	40	64,0	65,0	76,0	68,3
Plantio Convencional					
I	15	25,7	27,5	24,3	25,8
II	30	51,3	54,9	48,5	51,6
III	40	68,4	73,2	64,7	68,8
IV	40	68,4	73,2	64,7	68,8
Preparo Mínimo					
I	15	28,1	16,8	22,6	22,5
II	30	56,3	33,5	45,1	45,0
III	40	75,0	44,7	60,2	60,0
IV	40	75,0	44,7	60,2	60,0
Plantio Direto Escarificado					
I	15	20,5	20,5	22,7	21,2
II	30	41,0	41,1	45,4	42,5
III	40	54,6	54,8	60,6	56,6
IV	40	54,6	54,8	60,6	56,6

I - de S até V1/V2; II - de V2 até R1; III - de R1 até R6/R7; IV - de R7 até R9, segundo COSTA (1996).

A análise estatística (ANOVA) para a variável *CAD* foi realizada em delineamento blocos ao acaso com parcelas subdivididas no tempo (STEEL e TORRIE, 1980) em arranjo bifatorial (4x4), considerando os fatores: sistema de manejo (plantio direto, plantio convencional, preparo mínimo e plantio direto escarificado) que constituíram as parcelas; e estádios fenológicos da cultura da soja (I, II, III e IV) que constituíram as subparcelas. O delineamento experimental contou com três blocos e 16 parcelas por bloco, o que totalizou 48 unidades experimentais. Estas análises foram realizadas com o auxílio do programa estatístico SOC (EMBRAPA, 1990).

#### 4.3.6 Fatores hídricos em função do estágio fenológico da cultura ( $\lambda$ )

Os cultivares BR 16, BRS 133 e CD 206, considerados cultivares de ciclo semiprecoce, apresentaram comportamento de cultivar semitardio, com ciclo de 140 dias, na região de Ponta

Grossa-PR. Desta forma, os fatores hídricos em função do estágio fenológico da cultura, utilizados nos modelos de JENSEN (1968) e MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974) foram, primeiramente, os mesmos calibrados por BERLATO (1987) para cultivares de ciclo semitardio a tardio, cujos valores correspondem a: 0,1288 para o subperíodo de 10 dias após a emergência até o início do florescimento; e 0,7790 para o subperíodo do início do florescimento até 50 dias após. Posteriormente, foram utilizados valores de  $\lambda$  provenientes do ajustamento em análise de regressão múltipla, a partir das transformadas logarítmicas da equação e método dos mínimos quadrados, para os modelos de JENSEN (1968) e MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974).

#### 4.3.7 Fator excedente ( $fe$ )

CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA (1986) propõem em seu modelo a utilização de um fator excedente ( $fe$ ) que penaliza a produção quando da ocorrência de excedente hídrico. Este fator relaciona o excedente do balanço hídrico ( $Exc$ ) e a evapotranspiração da cultura ( $ETc$ ) por meio da seguinte equação:

$$fe = \left[ 1 - \frac{(Exc - ETc)}{Exc} \right] \quad (36)$$

Sendo:  $fe$  – fator excedente (adimensional);  $Exc$  – excedente hídrico do período estudado (mm);  $ETc$  – evapotranspiração da cultura (mm).

BRUNINI et al. (1982) salientam que a única restrição é que o  $Exc$  tem que ser superior ou igual à  $ETc$ . Quando  $ETc$  for maior que  $Exc$ , o fator excedente deverá ser igualado a 1, independente do resultado.

#### 4.3.8 Coeficientes de penalização da produtividade por déficit ( $ky$ ) e excedente ( $ke$ ) hídrico

De acordo com DOORENBOS e KASSAM (1979), os coeficientes de penalização da produtividade por déficit hídrico a serem utilizados são: **(a)** 0,85 para todo o ciclo ( $ky$ ); e, **(b)** para cada estágio fenológico ( $ky_i$ ): igual a 0,2 para o desenvolvimento vegetativo; 0,8 - 1,0 para o florescimento e enchimento de grãos; e 0,2 para a maturação.

Já o coeficiente de penalização da produtividade por excedente hídrico ( $ke_i$ ), o qual foi proposto por CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA (1986), tem o valor 0,0 (zero) para o estágio de desenvolvimento vegetativo; e 0,1 para os estádios florescimento, enchimento de grãos e maturação.

#### 4.4 ANÁLISES DOS MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS

Estabelecidos os fatores e coeficientes a serem utilizados e realizado o balanço hídrico, para determinar os valores de  $ET_c$  e  $ER$  em cada  $i$ -ésimo estágio fenológico da cultura da soja e  $j$ -ésima safra na região de Ponta Grossa, as análises de estimativa das produtividades para cada sistema de manejo e safra estudados foram realizadas a partir da inserção dos modelos agrometeorológicos em uma planilha eletrônica.

A precisão da estimativa de cada modelo agrometeorológico foi determinada a partir de análise de regressão linear e correlação, realizada entre os valores anuais de produtividade real (levantado na região) e estimada com os referidos modelos na região de Ponta Grossa, considerando sistema de manejo adotado. Estas análises foram realizadas com o auxílio de uma planilha eletrônica.

#### 4.5 AJUSTE DOS COEFICIENTES $k_y$ , $k_{yi}$ E FATOR $\lambda$ PARA A CULTURA DA SOJA, NA REGIÃO DE PONTA GROSSA-PR

Com o intuito de verificar possíveis melhorias na estimativa das produtividades, obtidas com os modelos agrometeorológicos, também foi realizado um ajuste dos fatores  $k_y$ ,  $k_{yi}$  e  $\lambda$  para a região de Ponta Grossa-PR, utilizando os dados climáticos e culturais em que ocorreram as 11 safras da cultura da soja.

##### 4.5.1 Ajuste do coeficiente $k_y$ para todo o ciclo da cultura da soja

Baseando-se na equação de DOORENBOS e KASSAN (1979) (Equação 4), o ajuste do coeficiente  $k_y$  considerando todo o ciclo da cultura da soja para várias safras foi realizado seguindo os seguintes passos:

$$\frac{Y_r}{Y_p} = 1 - \left[ k_y \cdot \left( 1 - \frac{ER}{ET_c} \right) \right]$$

– Isolando  $k_y$  tem-se:

$$1 - \frac{Y_r}{Y_p} = k_y \cdot \left( 1 - \frac{ER}{ET_c} \right)$$

– Para melhor representação matemática transformou-se os termos que continham a produtividade relativa e a evapotranspiração relativa, da seguinte forma:

$$Yt_j = 1 - \left( \frac{Yr_j}{Yp} \right) \quad Xt_j = \left( 1 - \frac{ER}{ETc} \right)_j$$

A equação transformada é representada por:

$$\hat{Yt}_j = ky \cdot Xt_j \quad (37)$$

Sendo:  $\hat{Yt}_j$  – estimativa da produtividade transformada na  $j$ -ésima safra (adimensional)  $Xt_j$  – evapotranspiração relativa transformada da  $j$ -ésima safra (adimensional);  $ky$  – coeficientes de penalização da produtividade por déficit hídrico para todo o ciclo da cultura (adimensional);  $Yr_j$  – produtividade da cultura na  $j$ -ésima safra ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ );  $Yp$  – produtividade potencial da cultura ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ );  $ER_j$  – evapotranspiração real na  $j$ -ésima safra ( $\text{mm} \cdot \text{ciclo}^{-1}$ );  $ETc_j$  – evapotranspiração da cultura na  $j$ -ésima safra ( $\text{mm} \cdot \text{ciclo}^{-1}$ ).

– Logo após, com o método dos Mínimos Quadrados, realizou-se a soma dos quadrados dos desvios entre as produtividades reais transformadas ( $Yt_j$ ) e a produtividade estimada ( $\hat{Yt}_j$ ) de cada  $j$ -ésima safra, por meio da seguinte equação:

$$Z = \sum_{j=1}^n (Yt_j - \hat{Yt}_j)^2 \quad (38)$$

Substituindo a Equação 37 na Equação 38, tem-se:

$$Z = \sum_{j=1}^n (Yt_j - ky \cdot Xt_j)^2 = 0 \quad (39)$$

– Derivando a função  $Z$  (Equação 39) em função do coeficiente  $ky$  e igualando a derivada a zero, para obter um somatório de desvios mínimo, tem-se:

$$\frac{dZ}{dky} = \sum_{j=1}^n (Yt_j - ky \cdot Xt_j) = 0 \quad (40)$$

$$ky = \frac{\sum_{j=1}^n Yt_j}{\sum_{j=1}^n Xt_j} \quad (41)$$

#### 4.5.2 Ajuste dos coeficientes $ky_i$ para cada estágio fenológico da cultura da soja

Os coeficientes de penalização da produtividade por déficit ( $ky_i$ ) foram estimados em um ajuste envolvendo regressão múltipla, a partir da transformação de alguns termos do modelo original de STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) (Equação 05) e método dos mínimos quadrados, conforme demonstrado de forma simplificada a seguir:

$$\frac{Yr}{Yp} = 1 - \left[ \sum_{i=1}^n ky_i \cdot \left( 1 - \frac{ER}{ETc} \right)_i \right]$$

– Inserindo no modelo de STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) os estádios fenológicos descritos por COSTA (1996), cujos períodos foram adaptados segundo recomendações de FARIAS et al. (2001), tem-se:

$$\frac{Yr}{Yp} = 1 - \left[ ky_I \cdot \left( 1 - \frac{ER_I}{ETc_I} \right) + ky_{II} \cdot \left( 1 - \frac{ER_{II}}{ETc_{II}} \right) + ky_{III} \cdot \left( 1 - \frac{ER_{III}}{ETc_{III}} \right) + ky_{IV} \cdot \left( 1 - \frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}} \right) \right]$$

– Isolando  $ky_i$  tem-se:

$$1 - \frac{Yr}{Yp} = ky_I \cdot \left( 1 - \frac{ER_I}{ETc_I} \right) + ky_{II} \cdot \left( 1 - \frac{ER_{II}}{ETc_{II}} \right) + ky_{III} \cdot \left( 1 - \frac{ER_{III}}{ETc_{III}} \right) + ky_{IV} \cdot \left( 1 - \frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}} \right)$$

– Posteriormente, para melhor representação matemática transformou-se os termos que continham a produtividade relativa e a evapotranspiração relativa de cada  $i$ -ésimo estágio fenológico e  $j$ -ésima safra, da seguinte forma:

$$Yt_j = 1 - \left( \frac{Yr_j}{Yp} \right)$$

$$Xt_{Ij} = \left( 1 - \frac{ER_I}{ETc_I} \right)_j \quad Xt_{IIj} = \left( 1 - \frac{ER_{II}}{ETc_{II}} \right)_j \quad Xt_{IIIj} = \left( 1 - \frac{ER_{III}}{ETc_{III}} \right)_j \quad Xt_{IVj} = \left( 1 - \frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}} \right)_j$$

A equação transformada e simplificada é representada por:

$$\hat{Yt}_j = ky_0 + ky_I \cdot Xt_{Ij} + ky_{II} \cdot Xt_{IIj} + ky_{III} \cdot Xt_{IIIj} + ky_{IV} \cdot Xt_{IVj} \quad (42)$$

Sendo:  $\hat{Yt}_j$  – estimativa da produtividade transformada na  $j$ -ésima safra (adimensional);  $Xt_{Ij}$ ,  $Xt_{IIj}$ ,  $Xt_{IIIj}$ ,  $Xt_{IVj}$  – evapotranspiração relativa transformada no  $i$ -ésimo estágio fenológico da cultura e  $j$ -ésima safra (adimensional);  $ky_0$ ,  $ky_I$ ,  $ky_{II}$ ,  $ky_{III}$ ,  $ky_{IV}$  – coeficientes de penalização da produtividade por déficit hídrico no estágio fenológico I, II, III ou IV da cultura da soja (adimensional) – O

coeficiente  $ky_0$  é apresentado apenas para fins de entendimento analítico, sendo nos cálculos assumido com valor igual a zero;  $Yp$  – produtividade potencial da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ );  $ER_{Ij}$ ,  $ER_{IIj}$ ,  $ER_{IIIj}$ ,  $ER_{IVj}$  – evapotranspiração real no  $i$ -ésimo estágio fenológico e  $j$ -ésima safra ( $\text{mm}\cdot\text{estádio}^{-1}$ );  $ET_{cIj}$ ,  $ET_{cIIj}$ ,  $ET_{cIIIj}$ ,  $ET_{cIVj}$  – evapotranspiração da cultura em cada  $i$ -ésimo estágio fenológico e  $j$ -ésima safra ( $\text{mm}\cdot\text{estádio}^{-1}$ ).

– A partir das simplificações, realizou-se a soma dos quadrados dos desvios (Equação 38) entre as produtividades reais transformadas ( $Yt_j$ ) e a produtividade estimada ( $\hat{Y}t_j$ ) de cada  $j$ -ésima safra, o qual está descrito detalhadamente no Anexo D.

– Em seguida, as equações foram dispostas em forma matricial, obtendo-se um sistema de equações do tipo  $[A]\cdot[x] = [b]$ . O sistema foi solucionado por meio do Método da Eliminação de Gauss, em que os valores dos coeficientes  $ky_I$ ,  $ky_{II}$ ,  $ky_{III}$ ,  $ky_{IV}$  foram encontrados. O detalhamento do Método da Eliminação de Gauss é descrito no Anexo E;

– Por fim, foi realizada a operação inversa à transformação, retornando-se a equação em sua forma original.

Os valores de  $ky_i$  obtidos a partir do ajuste da equação de STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) foram os mesmos utilizados para o modelo RAO, SARMA e CHANDER (1988).

#### 4.5.3 Ajuste dos fatores de penalização da produtividade por déficit hídrico em função do estágio fenológico da cultura ( $\lambda$ ) para o modelo de JENSEN (1968)

Os fatores hídricos em função do estágio fenológico da cultura ( $\lambda$ ) foram estimados com um ajuste envolvendo regressão múltipla, a partir das transformadas logarítmicas para linearização do modelo de JENSEN (1968) (Equação 2) e método dos mínimos quadrados, conforme demonstrado, de forma simplificada, a seguir:

$$\frac{Yr}{Yp} = \prod_{i=1}^n \left( \frac{ER}{ETc} \right)_i^{\lambda_i}$$

– Inserindo no modelo de JENSEN (1968) os estágios fenológicos descritos por COSTA (1996), cujos períodos foram adaptados segundo recomendações de FARIAS et al. (2001), tem-se:

$$\frac{Yr}{Yp} = \left( \frac{ER_I}{ETc_I} \right)^{\lambda_I} \cdot \left( \frac{ER_{II}}{ETc_{II}} \right)^{\lambda_{II}} \cdot \left( \frac{ER_{III}}{ETc_{III}} \right)^{\lambda_{III}} \cdot \left( \frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}} \right)^{\lambda_{IV}}$$

– Para a linearização da função, aplicou-se logaritmo neperiano:

$$\ln\left(\frac{Yr}{Yp}\right) = \ln\left[\left(\frac{ER_I}{ETc_I}\right)^{\lambda_I} \cdot \left(\frac{ER_{II}}{ETc_{II}}\right)^{\lambda_{II}} \cdot \left(\frac{ER_{III}}{ETc_{III}}\right)^{\lambda_{III}} \cdot \left(\frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}}\right)^{\lambda_{IV}}\right]$$

– Aplicando-se a propriedade logarítmica referente à multiplicação, tem-se:

$$\ln\left(\frac{Yr}{Yp}\right) = \ln\left(\frac{ER_I}{ETc_I}\right)^{\lambda_I} + \ln\left(\frac{ER_{II}}{ETc_{II}}\right)^{\lambda_{II}} + \ln\left(\frac{ER_{III}}{ETc_{III}}\right)^{\lambda_{III}} + \ln\left(\frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}}\right)^{\lambda_{IV}}$$

– Em seguida, aplicou-se a propriedade logarítmica referente à potenciação:

$$\ln\left(\frac{Yr}{Yp}\right) = \lambda_I \cdot \ln\left(\frac{ER_I}{ETc_I}\right) + \lambda_{II} \cdot \ln\left(\frac{ER_{II}}{ETc_{II}}\right) + \lambda_{III} \cdot \ln\left(\frac{ER_{III}}{ETc_{III}}\right) + \lambda_{IV} \cdot \ln\left(\frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}}\right)$$

– Posteriormente, para melhor representação matemática transformou-se os termos que continham a produtividade relativa e a evapotranspiração relativa de cada estágio fenológico, da seguinte forma:

$$Yt_j = \ln\left(\frac{Yr_j}{Yp}\right)$$

$$Xt_{Ij} = \ln\left(\frac{ER_I}{ETc_I}\right)_j \quad Xt_{IIj} = \ln\left(\frac{ER_{II}}{ETc_{II}}\right)_j \quad Xt_{IIIj} = \ln\left(\frac{ER_{III}}{ETc_{III}}\right)_j \quad Xt_{IVj} = \ln\left(\frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}}\right)_j$$

A equação transformada e simplificada é representada por:

$$\hat{Yt}_j = \lambda_0 + \lambda_I \cdot Xt_{Ij} + \lambda_{II} \cdot Xt_{IIj} + \lambda_{III} \cdot Xt_{IIIj} + \lambda_{IV} \cdot Xt_{IVj} \quad (43)$$

Sendo:  $\lambda_0$ ,  $\lambda_I$ ,  $\lambda_{II}$ ,  $\lambda_{III}$ ,  $\lambda_{IV}$  – fatores de penalização da produtividade por déficit hídrico nos estádios fenológicos I, II, III e IV da cultura da soja, respectivamente (adimensional) – O fator  $\lambda_0$  é apresentado apenas para fins de entendimento analítico, sendo nos cálculos assumido com valor igual a zero.

– A partir das simplificações, realizou-se a soma dos quadrados dos desvios (Equação 38) entre as produtividades reais transformadas ( $Yt_j$ ) e a produtividade estimada ( $\hat{Yt}_j$ ) de cada  $j$ -ésima safra, o qual é descrito detalhadamente no Anexo D;

– Em seguida, as equações foram dispostas em forma matricial, obtendo-se um sistema de equações do tipo  $[A] \cdot [x] = [b]$ . O sistema foi solucionado por meio do Método da Eliminação

de Gauss, em que os valores dos fatores  $\lambda_I$ ,  $\lambda_{II}$ ,  $\lambda_{III}$ ,  $\lambda_{IV}$  foram encontrados. O detalhamento do Método da Eliminação de Gauss é descrito no Anexo E;

– Por fim, foi realizada a operação inversa à transformação, retornando-se a equação em sua forma original.

#### 4.5.4 Ajuste dos fatores de penalização da produtividade por déficit hídrico em função do estágio fenológico da cultura ( $\lambda$ ) para o modelo de MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974)

Os fatores de penalização da produtividade por déficit hídrico em função do estágio fenológico da cultura ( $\lambda$ ) também foram ajustados a partir das transformadas logarítmicas do modelo de MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974) (Equação 3) e método dos mínimos quadrados, conforme demonstrado a seguir:

$$\frac{Yr}{Yp} = \prod_{i=1}^n \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER}{ETc} \right)_i^2 \right]^{\lambda_i}$$

– Inserindo no modelo de MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974) os estádios fenológicos descritos por COSTA (1996), cujos períodos foram adaptados segundo recomendações de FARIAS et al. (2001), tem-se:

$$\frac{Yr}{Yp} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_I}{ETc_I} \right) \right]^{\lambda_I} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_{II}}{ETc_{II}} \right) \right]^{\lambda_{II}} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_{III}}{ETc_{III}} \right) \right]^{\lambda_{III}} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}} \right) \right]^{\lambda_{IV}}$$

– Para a linearização da função, aplicou-se logaritmo neperiano:

$$\ln\left(\frac{Yr}{Yp}\right) = \ln\left\{ \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_I}{ETc_I} \right) \right]^{\lambda_I} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_{II}}{ETc_{II}} \right) \right]^{\lambda_{II}} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_{III}}{ETc_{III}} \right) \right]^{\lambda_{III}} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}} \right) \right]^{\lambda_{IV}} \right\}$$

– Aplicando-se a propriedade logarítmica referente à multiplicação, tem-se:

$$\ln\left(\frac{Yr}{Yp}\right) = \ln\left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_I}{ETc_I} \right) \right]^{\lambda_I} + \ln\left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_{II}}{ETc_{II}} \right) \right]^{\lambda_{II}} + \ln\left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_{III}}{ETc_{III}} \right) \right]^{\lambda_{III}} + \ln\left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}} \right) \right]^{\lambda_{IV}}$$



– Em seguida, aplicou-se a propriedade logarítmica referente à potenciação:

$$\ln\left(\frac{Yr}{Yp}\right) = \lambda_I \cdot \ln\left[1 - \left(1 - \frac{ER_I}{ETc_I}\right)\right] + \lambda_{II} \cdot \ln\left[1 - \left(1 - \frac{ER_{II}}{ETc_{II}}\right)\right] + \lambda_{III} \cdot \ln\left[1 - \left(1 - \frac{ER_{III}}{ETc_{III}}\right)\right] + \lambda_{IV} \cdot \ln\left[1 - \left(1 - \frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}}\right)\right]$$

– Posteriormente, para melhor representação matemática transformou-se os termos que continham a produtividade relativa e a evapotranspiração relativa de cada estágio fenológico, da seguinte forma:

$$Yt_j = \ln\left(\frac{Yr_j}{Yp}\right)$$

$$Xt_{Ij} = \ln\left[1 - \left(1 - \frac{ER_I}{ETc_I}\right)^2\right]_j$$

$$Xt_{IIj} = \ln\left[1 - \left(1 - \frac{ER_{II}}{ETc_{II}}\right)^2\right]_j$$

$$Xt_{IIIj} = \ln\left[1 - \left(1 - \frac{ER_{III}}{ETc_{III}}\right)^2\right]_j$$

$$Xt_{IVj} = \ln\left[1 - \left(1 - \frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}}\right)^2\right]_j$$

Após a operação de transformação e simplificação, a equação ficou com a mesma representação disposta na Equação 43:

$$\hat{Y}t_j = \lambda_0 + \lambda_I \cdot Xt_{Ij} + \lambda_{II} \cdot Xt_{IIj} + \lambda_{III} \cdot Xt_{IIIj} + \lambda_{IV} \cdot Xt_{IVj}$$

– A soma dos quadrados dos desvios (Equação 38) entre as produtividades reais transformadas ( $Yt_j$ ) e a produtividade estimada ( $\hat{Y}t_j$ ) de cada  $j$ -ésima safra, bem como a solução do sistema de equações para encontrar os valores de  $\lambda_I$ ,  $\lambda_{II}$ ,  $\lambda_{III}$ ,  $\lambda_{IV}$ , encontra-se descrito detalhadamente nos Anexo D e Anexo E, respectivamente.

#### 4.6 ÍNDICE DE CONCORDÂNCIA DE WILLMOTT et al. (1985) PARA A CULTURA DA SOJA, NA REGIÃO DE PONTA GROSSA-PR

Para avaliar o grau de exatidão entre valores de produtividade reais e estimados da cultura da soja, foi utilizado o índice “ $d$ ” de concordância de WILLMOTT et al. (1985), cuja equação é apresentada abaixo. Os valores deste índice podem variar de zero a 1 (um), sendo que quanto mais próximo da unidade, melhor será a exatidão das estimativas do modelo.

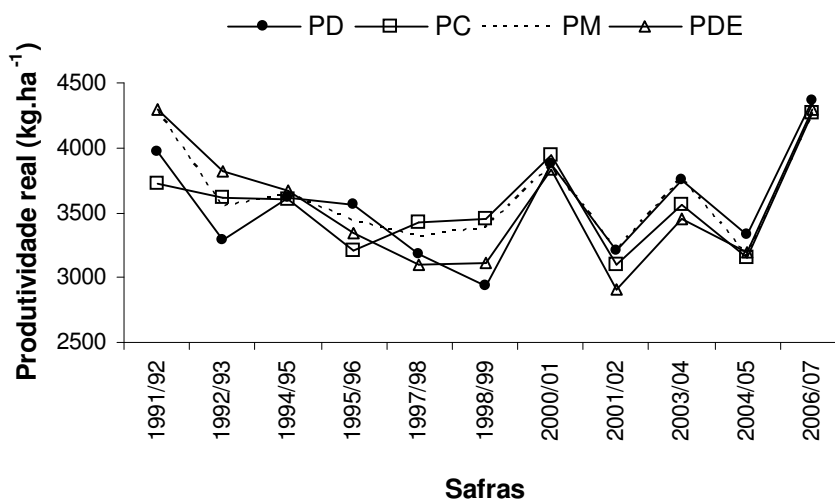
$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{j=1}^n (\hat{Y}_j - Y_{r_j})^2}{\sum_{j=1}^n \left( |\hat{Y}_j - \bar{Y}_r| + |Y_{r_j} - \bar{Y}_r| \right)^2} \right] \quad (44)$$

Sendo:  $d$  – índice de concordância de WILLMOTT et al. (1985);  $\hat{Y}_j$  – produtividade estimada na  $j$ -ésima safra ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ );  $Y_{r_j}$  – produtividade real observada na  $j$ -ésima safra ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ );  $\bar{Y}_r$  – média das produtividades reais observadas ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ );  $n$  – número de safras.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ANÁLISE DA PRODUTIVIDADE REAL DA CULTURA DA SOJA, NA REGIÃO DE PONTA GROSSA-PR

A Figura 5.1 apresenta as médias das produtividades alcançadas nos quatro sistemas de manejo adotados na Estação Experimental da Fundação ABC. É possível observar que as produtividades registradas estiveram, em média, próximas à produtividade média registrada na região de Ponta Grossa, a qual foi de  $3250 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ .



**FIGURA 5.1** – Média da produtividade real da cultura da soja, nos quatro sistemas de manejo adotados na Estação Experimental da Fundação ABC, ao longo de 11 safras: PD – plantio direto; PC – plantio convencional; PM – preparo mínimo; e, PDE – plantio direto escarificado a cada três anos.

Medidas de tendência e dispersão das médias das produtividades reais apresentadas na Figura 5.1 evidenciaram que os quatro sistemas de plantio tiveram resultados semelhantes. Esta constatação foi confirmada a partir dos resultados da análise estatística (ANOVA) comparando as médias das produtividades reais entre os quatro sistemas de manejo (Tabela 5.1).

**TABELA 5.1** – Análise de variância (ANOVA) para a média da produtividade real da cultura da soja, na região de Ponta Grossa-PR, em função dos quatro sistemas de manejo (PD, PC, PM e PDE), em 11 safras.

<b>Causas da variação</b>	<b>Graus de liberdade</b>	<b>Quadrado médio</b> Produtividade (kg·ha <sup>-1</sup> )
Sistema de manejo (SM)	3	16.363,37 <sup>ns</sup>
Resíduo	40	167.912,75
Média	—	3.567,50
Coeficiente de variação (%)	—	11,48

ns – não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro, pelo teste F.

A análise de variância não revelou (Tabela 5.1) a existência de diferenças significativas ao nível de 5% probabilidade de erro entre os quatro sistemas de manejos (PD, PC, PM e PDE) estudados. Este resultado concorda com o obtido por PAULETTI et al. (2003), os quais avaliaram a produtividade do milho nos quatro sistemas de manejo (PD, PC, PM e PDE), utilizando a mesma área do presente estudo. Os autores concluíram que o rendimento de grãos de milho não foi afetado pelo sistema de manejo do solo e de culturas ao longo dos anos. CAMARA e KLEIN (2005), avaliando o efeito de dois mecanismos de escarificação em áreas sob o plantio direto, também verificaram que o rendimento de grãos da cultura da soja não apresentou diferença significativa entre os sistemas de manejo do solo adotados.

O clima e solo da região estudada são outros fatores que podem ter contribuído para a inexistência de diferenças significativas estatisticamente entre os sistemas de manejo (PD, PC, PM e PDE) analisados. O clima na região de Ponta Grossa caracteriza-se por apresentar temperaturas amenas (em torno de 20 °C) e regime hídrico não restritivo ao cultivo em qualquer época do ano. O Latossolo Vermelho distrófico típico do local é profundo, bem drenado e estruturado, ou seja, tratava-se de um solo adequado em termos de penetração e distribuição de raízes, bem como no que se refere a sua capacidade de armazenar água no perfil. Diante destas características, a fertilidade do solo seria o fator mais limitante, contudo, de fácil correção. Tais características atribuem a este solo alto potencial para a implantação e condução de atividades agrícolas, o que provavelmente reduziu o efeito dos sistemas de manejo sobre a produtividade da cultura da soja.

## 5.2 BALANÇO HÍDRICO SEQUÊNCIAL PARA A CULTURA DA SOJA, NA REGIÃO DE PONTA GROSSA-PR

### 5.2.1 Considerações sobre os valores das componentes do balanço hídrico sequencial

Os valores das componentes do balanço hídrico sequencial, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob os quatro sistemas de manejo, para cada safra analisada, estão apresentados nas Tabelas 5.2 a 5.12. Analisando-se as tabelas, é possível observar que 79,5% e 85,8% dos subperíodos dos estádios fenológicos apresentaram déficit e excedente hídrico, respectivamente, para os quatro sistemas de manejo, nas 11 safras estudadas. Nos estádios semeadura, floração e enchimento de grãos (estádios I e III do presente trabalho), os quais são considerados os mais críticos à ocorrência de déficit hídrico, 84,1% dos subperíodos registraram sua ocorrência.

É válido relembrar que MARION (2004) afirma que muitos estudos têm verificado que os estádios I e III constituem-se em períodos críticos para a cultura da soja, sendo que a ocorrência de deficiência hídrica nesses estádios pode acarretar em perdas significativas na produtividade, por envolverem de forma direta a formação dos componentes primários do rendimento da cultura.

**TABELA 5.2** – Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – **Safra 1991/92.**

<b>Estádio fenológico</b>	<b>CAD (mm)</b>	<b>ET<sub>o</sub> (mm)</b>	<b>ET<sub>c</sub> (mm)</b>	<b>P (mm)</b>	<b>P-ET<sub>c</sub> (mm)</b>	<b>Arm (mm)</b>	<b>ER (mm)</b>	<b>Def (mm)</b>	<b>Exc (mm)</b>	<b>ER / ET<sub>c</sub> (estádio)</b>
<b>Plantio Direto</b>										
<b>I</b>	25,6	79,6	44,6	11,6	-33,0	3,4	9,4	35,2	0,0	0,21
<b>II</b>	51,3	199,9	241,9	263,3	21,4	13,5	181,7	60,2	71,5	0,75
<b>III</b>	68,3	185,8	278,6	262,7	-15,9	63,8	199,6	79,1	12,8	0,72
<b>IV</b>	68,3	86,0	77,4	163,4	86,0	53,1	77,4	0,0	96,6	1,00
<b>Plantio Convencional</b>										
<b>I</b>	25,8	79,6	44,6	11,6	-33,0	3,4	9,4	35,2	0,0	0,21
<b>II</b>	51,6	199,9	241,9	263,3	21,4	13,6	181,9	60,0	71,2	0,75
<b>III</b>	68,8	185,8	278,6	262,7	-15,9	64,3	199,6	79,1	12,4	0,72
<b>IV</b>	68,8	86,0	77,4	163,4	86,0	53,6	77,4	0,0	96,6	1,00
<b>Preparo Mínimo</b>										
<b>I</b>	22,5	79,6	44,6	11,6	-33,0	3,0	9,6	35,0	0,0	0,21
<b>II</b>	45,0	199,9	241,9	263,3	21,4	11,8	177,1	64,8	77,4	0,73
<b>III</b>	60,0	185,8	278,6	262,7	-15,9	55,5	199,1	79,5	19,8	0,71
<b>IV</b>	60,0	86,0	77,4	163,4	86,0	44,8	77,4	0,0	96,6	1,00
<b>Plantio Direto Escarificado</b>										
<b>I</b>	21,2	79,6	44,6	11,6	-33,0	2,9	9,6	35,0	0,0	0,22
<b>II</b>	42,5	199,9	241,9	263,3	21,4	10,2	174,2	67,7	81,8	0,72
<b>III</b>	56,6	185,8	278,6	262,7	-15,9	52,1	197,7	80,9	23,0	0,71
<b>IV</b>	56,6	86,0	77,4	163,4	86,0	41,4	77,4	0,0	96,7	1,00

**TABELA 5.3** – Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – **Safra 1992/93**.

<b>Estádio fenológico</b>	<b>CAD (mm)</b>	<b>ETo (mm)</b>	<b>ETc (mm)</b>	<b>P (mm)</b>	<b>P-ETc (mm)</b>	<b>Arm (mm)</b>	<b>ER (mm)</b>	<b>Def (mm)</b>	<b>Exc (mm)</b>	<b>ER / ETc (estádio)</b>
<b>Plantio Direto</b>										
<b>I</b>	25,6	54,0	30,2	86,6	56,4	8,4	28,8	1,4	54,8	0,95
<b>II</b>	51,3	185,6	224,5	260,3	35,8	44,4	149,5	75,0	74,8	0,67
<b>III</b>	68,3	154,1	231,1	368,0	136,9	38,3	230,7	0,4	143,4	1,00
<b>IV</b>	68,3	85,3	76,8	164,6	87,8	46,4	76,4	0,4	80,2	0,99
<b>Plantio Convencional</b>										
<b>I</b>	25,8	54,0	30,2	86,6	56,4	8,6	28,8	1,4	54,6	0,95
<b>II</b>	51,6	185,6	224,5	260,3	35,8	44,7	151,6	72,9	74,6	0,68
<b>III</b>	68,8	154,1	231,1	368,0	136,9	38,8	230,7	0,4	143,2	1,00
<b>IV</b>	68,8	85,3	76,8	164,6	87,8	46,9	76,4	0,4	80,1	0,99
<b>Preparo Mínimo</b>										
<b>I</b>	22,5	54,0	30,2	86,6	56,4	5,8	28,1	2,1	57,9	0,93
<b>II</b>	45,0	185,6	224,5	260,3	35,8	38,1	148,4	76,1	79,6	0,66
<b>III</b>	60,0	154,1	231,1	368,0	136,9	30,0	230,1	1,0	146,0	1,00
<b>IV</b>	60,0	85,3	76,8	164,6	87,8	38,1	75,2	1,6	81,3	0,98
<b>Plantio Direto Escarificado</b>										
<b>I</b>	21,2	54,0	30,2	86,6	56,4	5,2	27,8	2,4	58,8	0,92
<b>II</b>	42,5	185,6	224,5	260,3	35,8	35,6	148,4	76,1	81,5	0,66
<b>III</b>	56,6	154,1	231,1	368,0	136,9	26,8	229,6	1,5	147,3	0,99
<b>IV</b>	56,6	85,3	76,8	164,6	87,8	34,7	74,5	2,3	82,2	0,97

**TABELA 5.4** – Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – **Safra 1994/95**.

<b>Estádio fenológico</b>	<b>CAD (mm)</b>	<b>ETo (mm)</b>	<b>ETc (mm)</b>	<b>P (mm)</b>	<b>P-ETc (mm)</b>	<b>Arm (mm)</b>	<b>ER (mm)</b>	<b>Def (mm)</b>	<b>Exc (mm)</b>	<b>ER / ETc (estádio)</b>
<b>Plantio Direto</b>										
<b>I</b>	25,6	58,5	32,7	123,6	90,9	11,1	32,7	0,0	101,1	1,00
<b>II</b>	51,3	171,7	207,8	544,2	336,4	51,3	201,4	6,4	302,6	0,97
<b>III</b>	68,3	166,8	250,2	484,6	234,4	47,5	250,1	0,0	238,3	1,00
<b>IV</b>	68,3	89,3	80,3	92,8	12,5	51,7	80,3	0,0	8,3	1,00
<b>Plantio Convencional</b>										
<b>I</b>	25,8	58,5	32,7	123,6	90,9	11,3	32,7	0,0	101,1	1,00
<b>II</b>	51,6	171,7	207,8	544,2	336,4	51,6	201,5	6,3	302,4	0,97
<b>III</b>	68,8	166,8	250,2	484,6	234,4	48,0	250,1	0,0	238,1	1,00
<b>IV</b>	68,8	89,3	80,3	92,8	12,5	52,2	80,3	0,0	8,3	1,00
<b>Preparo Mínimo</b>										
<b>I</b>	22,5	58,5	32,7	123,6	90,9	8,2	32,5	0,2	101,1	0,99
<b>II</b>	45,0	171,7	207,8	544,2	336,4	45,0	198,0	9,8	309,4	0,95
<b>III</b>	60,0	166,8	250,2	484,6	234,4	39,6	249,6	0,5	240,4	1,00
<b>IV</b>	60,0	89,3	80,3	92,8	12,5	43,8	79,9	0,4	8,7	0,99
<b>Plantio Direto Escarificado</b>										
<b>I</b>	21,2	58,5	32,7	123,6	90,9	7,0	32,3	0,4	101,1	0,99
<b>II</b>	42,5	171,7	207,8	544,2	336,4	42,5	196,1	11,7	312,6	0,94
<b>III</b>	56,6	166,8	250,2	484,6	234,4	36,7	249,1	1,1	241,4	1,00
<b>IV</b>	56,6	89,3	80,3	92,8	12,5	40,7	79,5	0,8	9,2	0,99

**TABELA 5.5** – Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – **Safra 1995/96.**

<b>Estádio fenológico</b>	<b>CAD (mm)</b>	<b>ETo (mm)</b>	<b>ETc (mm)</b>	<b>P (mm)</b>	<b>P-ETc (mm)</b>	<b>Arm (mm)</b>	<b>ER (mm)</b>	<b>Def (mm)</b>	<b>Exc (mm)</b>	<b>ER / ETc (estádio)</b>
<b>Plantio Direto</b>										
<b>I</b>	25,6	70,6	39,5	48,1	8,6	14,1	33,7	5,8	6,5	0,85
<b>II</b>	51,3	166,5	201,5	221,5	20,0	50,2	145,7	55,8	39,6	0,72
<b>III</b>	68,3	157,4	236,1	423,8	187,7	60,7	236,1	0,0	177,3	1,00
<b>IV</b>	68,3	87,5	78,8	232,4	153,6	65,1	78,8	0,0	149,2	1,00
<b>Plantio Convencional</b>										
<b>I</b>	25,8	70,6	39,5	48,1	8,6	14,3	33,7	5,8	6,3	0,85
<b>II</b>	51,6	166,5	201,5	221,5	20,0	50,5	146,0	55,5	39,3	0,72
<b>III</b>	68,8	157,4	236,1	423,8	187,7	61,2	236,1	0,0	177,1	1,00
<b>IV</b>	68,8	87,5	78,8	232,4	153,6	65,6	78,8	0,0	149,2	1,00
<b>Preparo Mínimo</b>										
<b>I</b>	22,5	70,6	39,5	48,1	8,6	11,6	33,4	6,1	9,2	0,85
<b>II</b>	45,0	166,5	201,5	221,5	20,0	43,9	141,3	60,2	47,9	0,70
<b>III</b>	60,0	157,4	236,1	423,8	187,7	52,4	236,1	0,0	179,3	1,00
<b>IV</b>	60,0	87,5	78,8	232,4	153,6	56,8	78,8	0,0	149,2	1,00
<b>Plantio Direto Escarificado</b>										
<b>I</b>	21,2	70,6	39,5	48,1	8,6	10,7	33,1	6,4	10,3	0,84
<b>II</b>	42,5	166,5	201,5	221,5	20,0	41,4	139,4	62,1	51,4	0,69
<b>III</b>	56,6	157,4	236,1	423,8	187,7	49,0	236,0	0,0	180,2	1,00
<b>IV</b>	56,6	87,5	78,8	232,4	153,6	53,4	78,8	0,0	149,2	1,00

**TABELA 5.6** – Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – **Safra 1997/98.**

<b>Estádio fenológico</b>	<b>CAD (mm)</b>	<b>ETo (mm)</b>	<b>ETc (mm)</b>	<b>P (mm)</b>	<b>P-ETc (mm)</b>	<b>Arm (mm)</b>	<b>ER (mm)</b>	<b>Def (mm)</b>	<b>Exc (mm)</b>	<b>ER / ETc (estádio)</b>
<b>Plantio Direto</b>										
<b>I</b>	25,6	46,2	25,9	181,2	155,3	25,6	25,9	0,0	152,6	1,00
<b>II</b>	51,3	146,1	176,8	375,7	198,9	20,5	174,9	1,9	205,9	0,99
<b>III</b>	68,3	184,4	276,6	385,3	108,7	48,2	248,5	28,1	109,1	0,90
<b>IV</b>	68,3	88,2	79,4	263,4	184,0	68,3	79,4	0,0	163,9	1,00
<b>Plantio Convencional</b>										
<b>I</b>	25,8	46,2	25,9	181,2	155,3	25,8	25,9	0,0	152,6	1,00
<b>II</b>	51,6	146,1	176,8	375,7	198,9	20,8	175,0	1,8	205,7	0,99
<b>III</b>	68,8	184,4	276,6	385,3	108,7	48,7	248,9	27,7	108,4	0,90
<b>IV</b>	68,8	88,2	79,4	263,4	184,0	68,8	79,4	0,0	163,9	1,00
<b>Preparo Mínimo</b>										
<b>I</b>	22,5	46,2	25,9	181,2	155,3	22,5	25,9	0,0	152,6	1,00
<b>II</b>	45,0	146,1	176,8	375,7	198,9	14,9	173,9	2,9	209,4	0,98
<b>III</b>	60,0	184,4	276,6	385,3	108,7	39,9	240,6	35,9	119,6	0,87
<b>IV</b>	60,0	88,2	79,4	263,4	184,0	60,0	79,4	0,0	163,9	1,00
<b>Plantio Direto Escarificado</b>										
<b>I</b>	21,2	46,2	25,9	181,2	155,3	21,2	25,9	0,0	152,6	1,00
<b>II</b>	42,5	146,1	176,8	375,7	198,9	12,8	173,2	3,5	210,8	0,98
<b>III</b>	56,6	184,4	276,6	385,3	108,7	36,5	237,3	39,2	124,2	0,86
<b>IV</b>	56,6	88,2	79,4	263,4	184,0	56,6	79,4	0,0	164,0	1,00

**TABELA 5.7** – Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – **Safra 1998/99**.

<b>Estádio fenológico</b>	<b>CAD (mm)</b>	<b>ETo (mm)</b>	<b>ETc (mm)</b>	<b>P (mm)</b>	<b>P-ETc (mm)</b>	<b>Arm (mm)</b>	<b>ER (mm)</b>	<b>Def (mm)</b>	<b>Exc (mm)</b>	<b>ER / ETc (estádio)</b>
<b>Plantio Direto</b>										
<b>I</b>	25,6	60,6	33,9	17,6	-16,3	2,9	19,2	14,7	0,0	0,57
<b>II</b>	51,3	180,0	217,8	198,6	-19,2	32,3	151,9	65,9	17,4	0,70
<b>III</b>	68,3	164,7	247,1	324,4	77,3	67,7	242,6	4,5	46,3	0,98
<b>IV</b>	68,3	98,1	88,3	179,7	91,4	68,3	88,3	0,0	90,8	1,00
<b>Plantio Convencional</b>										
<b>I</b>	25,8	60,6	33,9	17,6	-16,3	2,9	19,4	14,6	0,0	0,57
<b>II</b>	51,6	180,0	217,8	198,6	-19,2	32,6	151,8	65,9	17,1	0,70
<b>III</b>	68,8	164,7	247,1	324,4	77,3	68,2	242,8	4,3	46,0	0,98
<b>IV</b>	68,8	98,1	88,3	179,7	91,4	68,8	88,3	0,0	90,8	1,00
<b>Preparo Mínimo</b>										
<b>I</b>	22,5	60,6	33,9	17,6	-16,3	2,3	17,5	16,4	0,0	0,52
<b>II</b>	45,0	180,0	217,8	198,6	-19,2	26,5	151,2	66,5	23,2	0,69
<b>III</b>	60,0	164,7	247,1	324,4	77,3	59,4	239,1	8,0	52,3	0,97
<b>IV</b>	60,0	98,1	88,3	179,7	91,4	60,0	88,3	0,0	90,8	1,00
<b>Plantio Direto Escarificado</b>										
<b>I</b>	21,2	60,6	33,9	17,6	-16,3	2,0	17,2	16,8	0,0	0,51
<b>II</b>	42,5	180,0	217,8	198,6	-19,2	24,4	150,7	67,1	25,5	0,69
<b>III</b>	56,6	164,7	247,1	324,4	77,3	56,0	237,3	9,8	55,4	0,96
<b>IV</b>	56,6	98,1	88,3	179,7	91,4	56,6	88,3	0,0	90,9	1,00

**TABELA 5.8** – Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – **Safra 2000/01**.

<b>Estádio fenológico</b>	<b>CAD (mm)</b>	<b>ETo (mm)</b>	<b>ETc (mm)</b>	<b>P (mm)</b>	<b>P-ETc (mm)</b>	<b>Arm (mm)</b>	<b>ER (mm)</b>	<b>Def (mm)</b>	<b>Exc (mm)</b>	<b>ER / ETc (estádio)</b>
<b>Plantio Direto</b>										
<b>I</b>	25,6	59,0	33,0	46,3	13,3	15,3	32,0	1,0	18,1	0,97
<b>II</b>	51,3	161,9	195,9	325,0	129,1	28,1	181,7	14,2	130,5	0,93
<b>III</b>	68,3	157,6	236,4	506,0	269,6	68,3	234,0	2,4	231,8	0,99
<b>IV</b>	68,3	92,5	83,3	42,6	-40,7	27,8	83,1	0,2	0,0	1,00
<b>Plantio Convencional</b>										
<b>I</b>	25,8	59,0	33,0	46,3	13,3	15,4	32,1	1,0	18,1	0,97
<b>II</b>	51,6	161,9	195,9	325,0	129,1	28,4	181,9	14,0	130,1	0,93
<b>III</b>	68,8	157,6	236,4	506,0	269,6	68,8	234,1	2,3	231,5	0,99
<b>IV</b>	68,8	92,5	83,3	42,6	-40,7	28,3	83,1	0,2	0,0	1,00
<b>Preparo Mínimo</b>										
<b>I</b>	22,5	59,0	33,0	46,3	13,3	13,2	31,0	2,0	18,1	0,94
<b>II</b>	45,0	161,9	195,9	325,0	129,1	21,8	176,0	19,9	140,4	0,90
<b>III</b>	60,0	157,6	236,4	506,0	269,6	60,0	232,0	4,4	235,8	0,98
<b>IV</b>	60,0	92,5	83,3	42,6	-40,7	20,3	82,3	0,9	0,0	0,99
<b>Plantio Direto Escarificado</b>										
<b>I</b>	21,2	59,0	33,0	46,3	13,3	12,4	30,5	2,6	18,1	0,92
<b>II</b>	42,5	161,9	195,9	325,0	129,1	19,3	173,4	22,5	144,7	0,88
<b>III</b>	56,6	157,6	236,4	506,0	269,6	56,6	230,8	5,6	237,9	0,98
<b>IV</b>	56,6	92,5	83,3	42,6	-40,7	17,5	81,7	1,5	0,0	0,98



**TABELA 5.9** – Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – **Safra 2001/02.**

<b>Estádio fenológico</b>	<b>CAD (mm)</b>	<b>ETo (mm)</b>	<b>ETc (mm)</b>	<b>P (mm)</b>	<b>P-ETc (mm)</b>	<b>Arm (mm)</b>	<b>ER (mm)</b>	<b>Def (mm)</b>	<b>Exc (mm)</b>	<b>ER / ETc (estádio)</b>
<b>Plantio Direto</b>										
<b>I</b>	25,6	56,5	31,7	77,6	45,9	25,0	12,2	19,5	41,3	0,38
<b>II</b>	51,3	162,9	197,1	163,3	-33,8	7,5	167,2	29,9	13,6	0,85
<b>III</b>	68,3	186,2	279,3	264,3	-15,0	17,8	191,7	87,6	62,4	0,69
<b>IV</b>	68,3	106,5	95,9	306,7	210,8	49,8	93,2	2,7	181,6	0,97
<b>Plantio Convencional</b>										
<b>I</b>	25,8	56,5	31,7	77,6	45,9	25,2	12,2	19,5	41,2	0,38
<b>II</b>	51,6	162,9	197,1	163,3	-33,8	7,6	167,5	29,6	13,4	0,85
<b>III</b>	68,8	186,2	279,3	264,3	-15,0	17,9	192,1	87,3	61,9	0,69
<b>IV</b>	68,8	106,5	95,9	306,7	210,8	50,3	93,2	2,7	181,2	0,97
<b>Preparo Mínimo</b>										
<b>I</b>	22,5	56,5	31,7	77,6	45,9	21,9	12,2	19,5	44,2	0,38
<b>II</b>	45,0	162,9	197,1	163,3	-33,8	5,5	161,7	35,4	18,0	0,82
<b>III</b>	60,0	186,2	279,3	264,3	-15,0	15,2	184,9	94,4	69,6	0,66
<b>IV</b>	60,0	106,5	95,9	306,7	210,8	41,5	93,0	2,9	187,4	0,97
<b>Plantio Direto Escarificado</b>										
<b>I</b>	21,2	56,5	31,7	77,6	45,9	20,6	12,2	19,5	45,4	0,38
<b>II</b>	42,5	162,9	197,1	163,3	-33,8	4,8	159,3	37,8	19,8	0,81
<b>III</b>	56,6	186,2	279,3	264,3	-15,0	14,3	182,1	97,2	72,7	0,65
<b>IV</b>	56,6	106,5	95,9	306,7	210,8	38,1	93,0	2,9	189,9	0,97

**TABELA 5.10** – Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – **Safra 2003/04.**

<b>Estádio fenológico</b>	<b>CAD (mm)</b>	<b>ETo (mm)</b>	<b>ETc (mm)</b>	<b>P (mm)</b>	<b>P-ETc (mm)</b>	<b>Arm (mm)</b>	<b>ER (mm)</b>	<b>Def (mm)</b>	<b>Exc (mm)</b>	<b>ER / ETc (estádio)</b>
<b>Plantio Direto</b>										
<b>I</b>	25,6	59,5	33,3	107,2	73,9	19,8	33,3	0,0	69,5	1,00
<b>II</b>	51,3	132,7	160,5	259,8	99,3	37,6	157,5	3,0	84,5	0,98
<b>III</b>	68,3	166,5	249,8	130,2	-119,6	9,8	158,0	91,7	0,0	0,63
<b>IV</b>	68,3	89,4	80,5	118,8	38,3	55,3	47,1	33,4	26,2	0,58
<b>Plantio Convencional</b>										
<b>I</b>	25,8	59,5	33,3	107,2	73,9	20,0	33,3	0,0	69,5	1,00
<b>II</b>	51,6	132,7	160,5	259,8	99,3	37,9	157,6	2,9	84,3	0,98
<b>III</b>	68,8	166,5	249,8	130,2	-119,6	9,9	158,2	91,5	0,0	0,63
<b>IV</b>	68,8	89,4	80,5	118,8	38,3	55,8	47,1	33,4	25,8	0,58
<b>Preparo Mínimo</b>										
<b>I</b>	22,5	59,5	33,3	107,2	73,9	16,7	33,2	0,1	69,6	1,00
<b>II</b>	45,0	132,7	160,5	259,8	99,3	31,3	155,9	4,6	89,3	0,97
<b>III</b>	60,0	166,5	249,8	130,2	-119,6	8,2	153,3	96,4	0,0	0,61
<b>IV</b>	60,0	89,4	80,5	118,8	38,3	47,0	46,9	33,6	33,1	0,58
<b>Plantio Direto Escarificado</b>										
<b>I</b>	21,2	59,5	33,3	107,2	73,9	15,4	33,0	0,3	69,8	0,99
<b>II</b>	42,5	132,7	160,5	259,8	99,3	28,8	154,9	5,7	91,6	0,96
<b>III</b>	56,6	166,5	249,8	130,2	-119,6	7,5	151,5	98,3	0,0	0,61
<b>IV</b>	56,6	89,4	80,5	118,8	38,3	43,6	46,8	33,7	35,9	0,58

**TABELA 5.11** – Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – **Safra 2004/05**.

<b>Estádio fenológico</b>	<b>CAD (mm)</b>	<b>ETo (mm)</b>	<b>ETc (mm)</b>	<b>P (mm)</b>	<b>P-ETc (mm)</b>	<b>Arm (mm)</b>	<b>ER (mm)</b>	<b>Def (mm)</b>	<b>Exc (mm)</b>	<b>ER / ETc (estádio)</b>
<b>Plantio Direto</b>										
<b>I</b>	25,6	54,5	30,5	45,6	15,1	7,4	29,5	1,0	25,1	0,97
<b>II</b>	51,3	152,9	185,0	330,8	145,8	51,3	164,2	20,8	122,7	0,89
<b>III</b>	68,3	161,7	242,6	227,4	-15,2	47,9	146,8	95,8	84,0	0,61
<b>IV</b>	68,3	95,8	86,2	17,8	-68,4	12,0	53,7	32,5	0,0	0,62
<b>Plantio Convencional</b>										
<b>I</b>	25,8	54,5	30,5	45,6	15,1	7,5	29,6	0,9	25,1	0,97
<b>II</b>	51,6	152,9	185,0	330,8	145,8	51,6	164,4	20,7	122,3	0,89
<b>III</b>	68,8	161,7	242,6	227,4	-15,2	48,0	147,3	95,3	83,7	0,61
<b>IV</b>	68,8	95,8	86,2	17,8	-68,4	12,2	53,6	32,5	0,0	0,62
<b>Preparo Mínimo</b>										
<b>I</b>	22,5	54,5	30,5	45,6	15,1	5,2	28,5	2,0	25,1	0,94
<b>II</b>	45,0	152,9	185,0	330,8	145,8	45,0	159,8	25,2	131,2	0,86
<b>III</b>	60,0	161,7	242,6	227,4	-15,2	46,9	137,3	105,2	88,1	0,57
<b>IV</b>	60,0	95,8	86,2	17,8	-68,4	10,3	54,4	31,8	0,0	0,63
<b>Plantio Direto Escarificado</b>										
<b>I</b>	21,2	54,5	30,5	45,6	15,1	4,5	28,0	2,5	25,1	0,92
<b>II</b>	42,5	152,9	185,0	330,8	145,8	42,5	158,0	27,1	134,8	0,85
<b>III</b>	56,6	161,7	242,6	227,4	-15,2	46,6	133,3	109,3	90,0	0,55
<b>IV</b>	56,6	95,8	86,2	17,8	-68,4	9,6	54,8	31,4	0,0	0,64

**TABELA 5.12** – Balanço hídrico sequencial para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, sob quatro sistemas de manejo – **Safra 2006/07**.

<b>Estádio fenológico</b>	<b>CAD (mm)</b>	<b>ETo (mm)</b>	<b>ETc (mm)</b>	<b>P (mm)</b>	<b>P-ETc (mm)</b>	<b>Arm (mm)</b>	<b>ER (mm)</b>	<b>Def (mm)</b>	<b>Exc (mm)</b>	<b>ER / ETc (estádio)</b>
<b>Plantio Direto</b>										
<b>I</b>	25,6	52,1	29,2	65,0	35,8	19,4	29,2	0,0	42,0	1,00
<b>II</b>	51,3	164,3	198,7	136,2	-62,5	26,8	128,5	70,2	0,3	0,65
<b>III</b>	68,3	177,5	266,3	269,0	2,7	23,0	238,2	28,1	34,6	0,89
<b>IV</b>	68,3	99,3	89,3	24,8	-64,5	7,3	40,5	48,8	0,0	0,45
<b>Plantio Convencional</b>										
<b>I</b>	25,8	52,1	29,2	65,0	35,8	19,6	29,2	0,0	42,0	1,00
<b>II</b>	51,6	164,3	198,7	136,2	-62,5	27,1	128,7	70,1	0,1	0,65
<b>III</b>	68,8	177,5	266,3	269,0	2,7	23,3	238,6	27,7	34,2	0,90
<b>IV</b>	68,8	99,3	89,3	24,8	-64,5	7,4	40,7	48,6	0,0	0,46
<b>Preparo Mínimo</b>										
<b>I</b>	22,5	52,1	29,2	65,0	35,8	16,3	29,2	0,0	42,0	1,00
<b>II</b>	45,0	164,3	198,7	136,2	-62,5	20,5	126,7	72,1	5,4	0,64
<b>III</b>	60,0	177,5	266,3	269,0	2,7	19,0	229,4	36,9	41,1	0,86
<b>IV</b>	60,0	99,3	89,3	24,8	-64,5	5,9	37,9	51,5	0,0	0,42
<b>Plantio Direto Escarificado</b>										
<b>I</b>	21,2	52,1	29,2	65,0	35,8	15,0	29,2	0,0	42,0	1,00
<b>II</b>	42,5	164,3	198,7	136,2	-62,5	18,0	125,8	72,9	7,4	0,63
<b>III</b>	56,6	177,5	266,3	269,0	2,7	17,6	225,3	41,0	44,1	0,85
<b>IV</b>	56,6	99,3	89,3	24,8	-64,5	5,4	37,0	52,4	0,0	0,41

Nas Tabelas 5.2 a 5.12 também é possível observar a similaridade entre os valores de *CAD* obtidos nos diferentes sistemas de manejo. Desta forma, a Tabela 5.13 apresenta um resumo da análise de variância (ANOVA) referente à *CAD*, para os estádios de desenvolvimento I a IV da cultura da soja, sob os quatro sistemas de manejo estudados.

**TABELA 5.13** – Resumo da análise de variância para a capacidade de água disponível no solo (*CAD*) para a cultura da soja, considerando os estádios de desenvolvimento I a IV e quatro sistemas de manejo, na Estação Experimental da Fundação ABC, Ponta Grossa-PR.

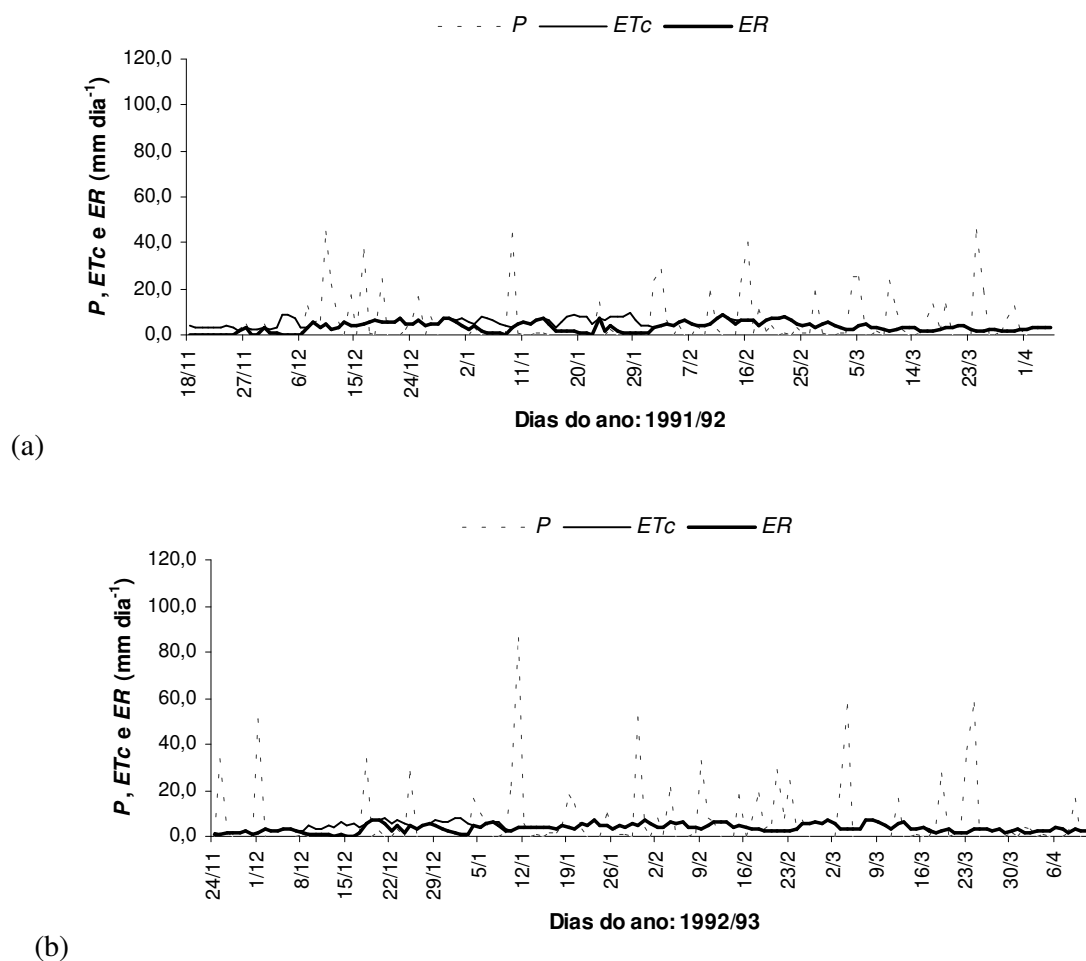
Causas da variação	Graus de liberdade	Quadrado médio
		<i>CAD</i> (mm)
Bloco	2	117,86 <sup>ns</sup>
Sistema de manejo (SM)	3	269,59 <sup>ns</sup>
Parcela	6	207,86**
Estádio (ES)	3	4209,96**
SM * ES	9	9,53 <sup>ns</sup>
Resíduo	24	6,65
Média	—	49,56
Coefficiente de variação (%)	—	5,20

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro, pelo teste F; ns – não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro, pelo teste F.

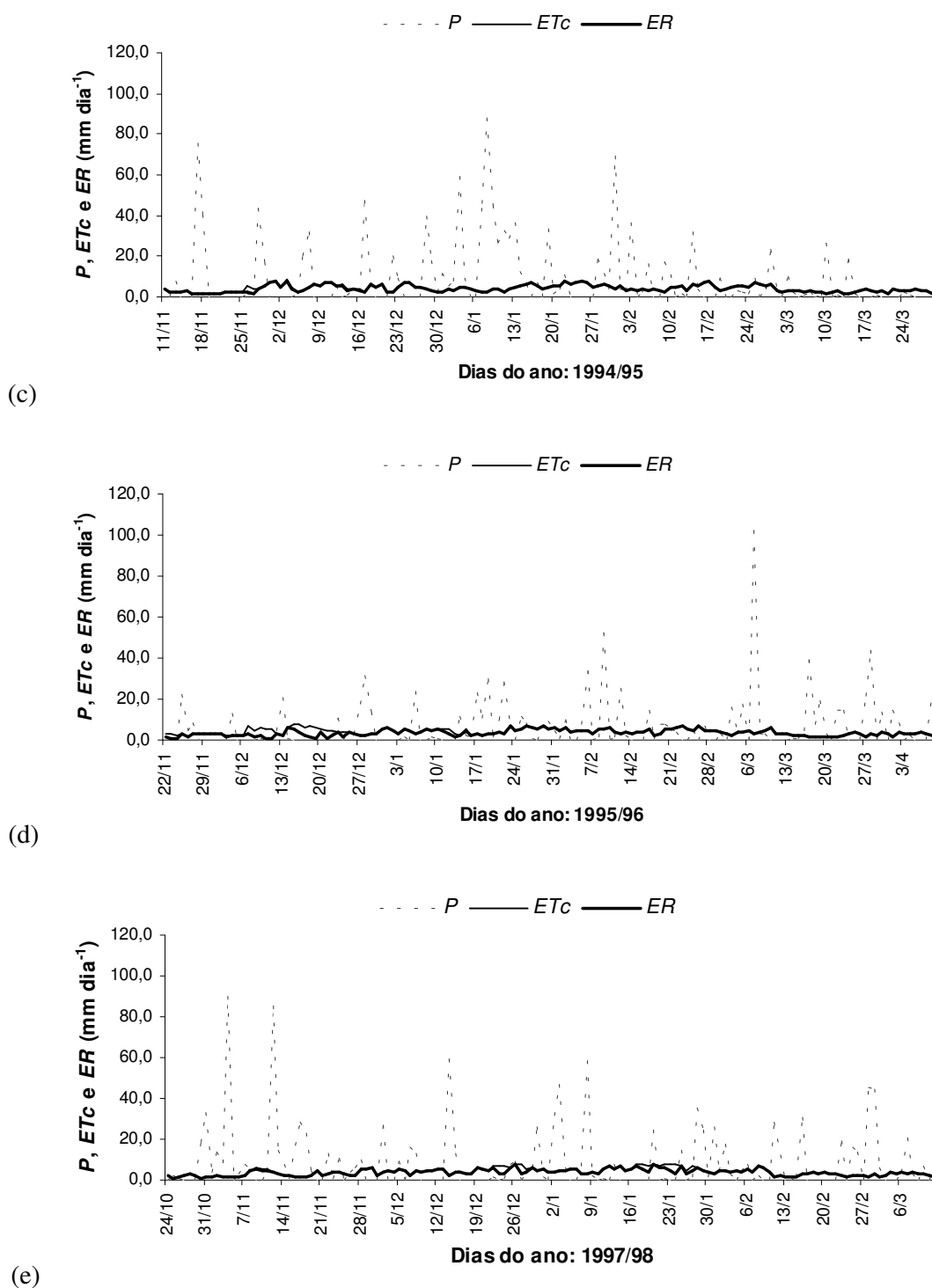
A análise (Tabela 5.13) não revelou efeito significativo entre os sistemas de manejo testados ao nível de 5% de probabilidade de erro. Este resultado diferiu do esperado, visto que diversos autores (VEIGA e AMADO, 1994; CALEGARI et al., 2006; LLANILLO et al., 2006) afirmam que o sistema de manejo interfere em muitos atributos do solo, entre eles a condutividade hidráulica e conteúdo de água disponível, por promover, entre outros aspectos, a diminuição do tamanho de agregados e aumento temporário do espaço poroso. Sabe-se, também, que o efeito do preparo não depende apenas do implemento empregado, mas também da forma e intensidade de seu uso (VEIGA e AMADO, 1994), sendo que sistemas de manejo baseados em um preparo mais intenso, resultam na pulverização excessiva do solo, levando a aceleração dos processos de degradação (SEIXAS, ROLOFF e RALISCH, 2005). Assim, diante das diferenças entre os sistemas de manejo testados, era esperado que existissem diferenças entre as *CADs*, o que não se confirmou.

A Figura 5.2 apresenta o balanço hídrico diário do período compreendido entre os estádios fenológicos I a IV, para as 11 safras da cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR. Na realização dos balanços hídricos empregou-se um valor médio de *CAD* (média das *CADs* encontradas nos quatro sistemas de manejo) para cada estágio fenológico da cultura, devido a inexistência de efeito significativo entre as *CADs* dos sistemas de manejo testados ao nível de 5% de probabilidade de erro.

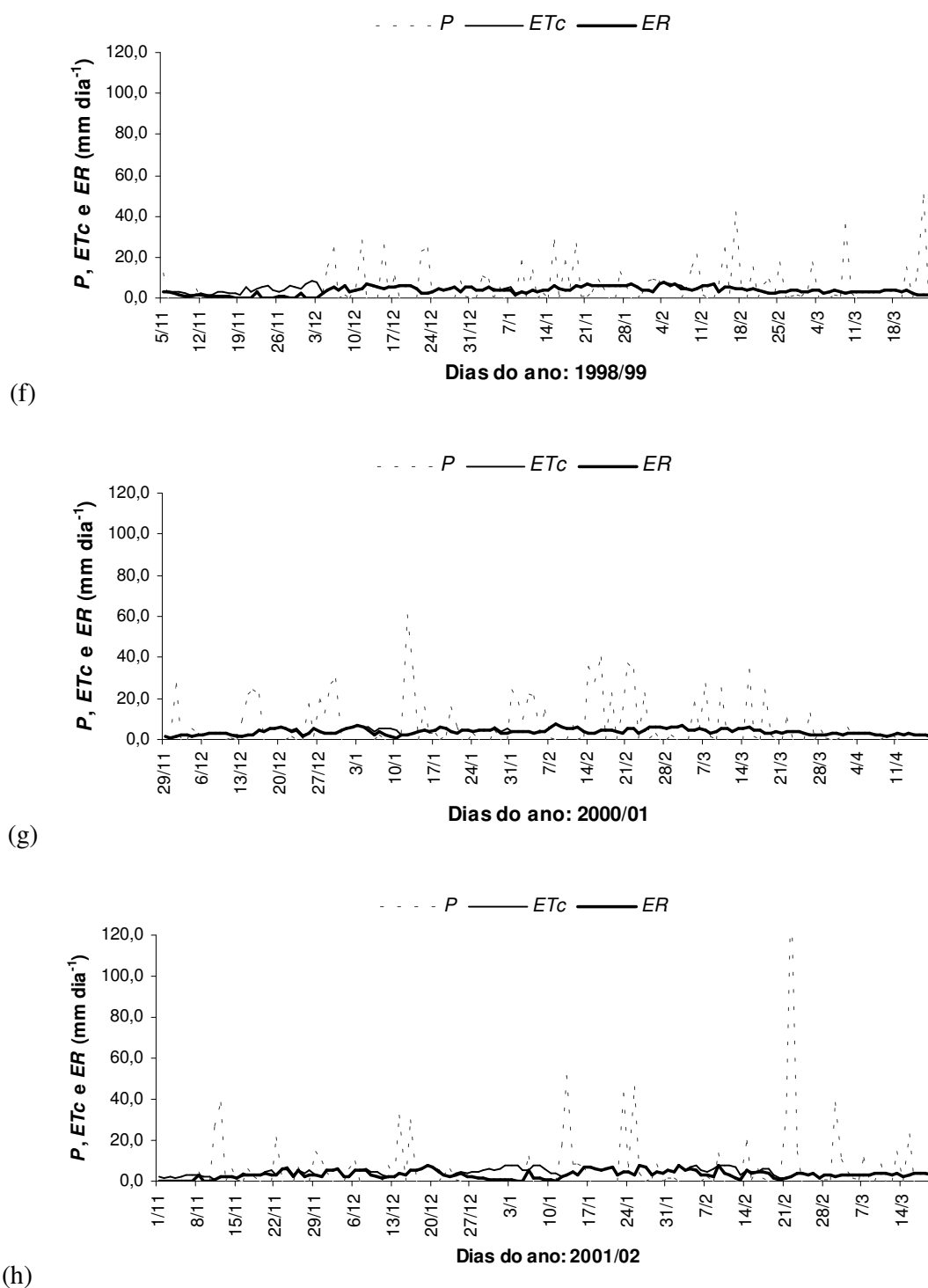
É importante observar também, para evitar erros quanto à estimativa da quantidade de água armazenada do solo (*ARM*) no momento do plantio da cultura da soja, que os balanços hídricos realizados para as 11 safras analisadas foram iniciados no mês de junho. O início do balanço hídrico neste mês foi suficiente para garantir confiabilidade na estimativa do valor do *ARM* no momento do plantio, não havendo mais constatação de variabilidade. Nas simulações envolvendo as 11 safras analisadas, comprovou-se este fato até mesmo quando o *ARM* foi considerado igual à zero no início do mês de junho de uma determinada safra.



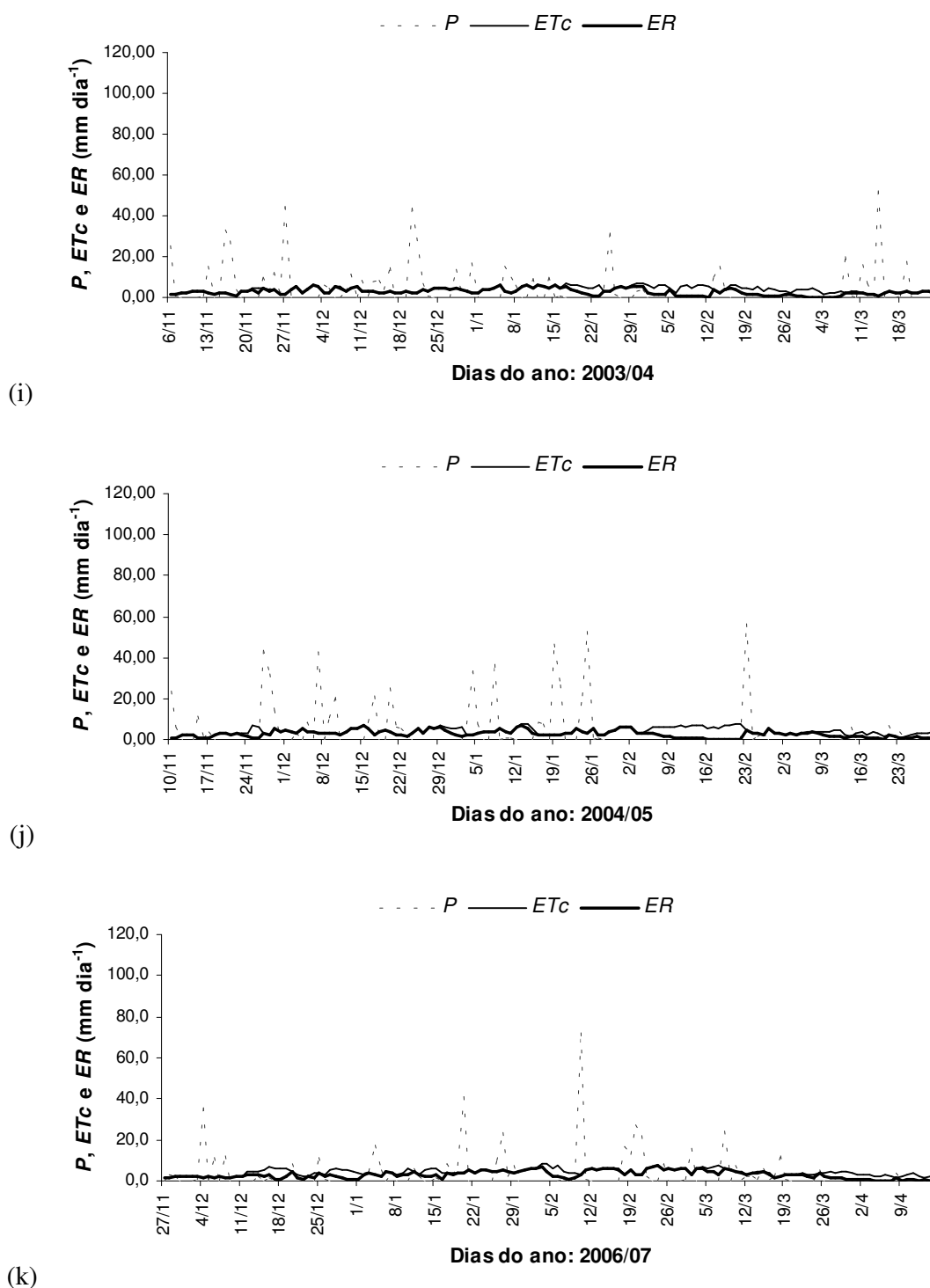
**FIGURA 5.2** – Balanço hídrico sequencial diário para cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, para as safras: (a) 1991/92; (b) 1992/93; (c) 1994/95; (d) 1995/96; (e) 1997/98; (f) 1998/99; (g) 2000/01; (h) 2001/02; (i) 2003/04; (j) 2004/05; e, (k) 2006/07.



**FIGURA 5.2** – Balanço hídrico sequencial diário para cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, para as safras: (a) 1991/92; (b) 1992/93; (c) 1994/95; (d) 1995/96; (e) 1997/98; (f) 1998/99; (g) 2000/01; (h) 2001/02; (i) 2003/04; (j) 2004/05; e, (k) 2006/07.



**FIGURA 5.2** – Balanço hídrico sequencial diário para cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, para as safras: (a) 1991/92; (b) 1992/93; (c) 1994/95; (d) 1995/96; (e) 1997/98; (f) 1998/99; (g) 2000/01; (h) 2001/02; (i) 2003/04; (j) 2004/05; e, (k) 2006/07.



**FIGURA 5.2** – Balanço hídrico sequencial diário para cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, nos estádios de desenvolvimento I a IV, para as safras: (a) 1991/92; (b) 1992/93; (c) 1994/95; (d) 1995/96; (e) 1997/98; (f) 1998/99; (g) 2000/01; (h) 2001/02; (i) 2003/04; (j) 2004/05; e, (k) 2006/07.

Os períodos mais prolongados de deficiência hídrica ocorreram nas safras:

- 1991/92 (Figura 5.2a): verificou-se a ocorrência de vários pontos de déficit hídrico ao longo do ciclo, nos quais a *ER* atingiu o valor zero. No início do ciclo da cultura foi registrado um período superior a 30 dias com deficiência hídrica;
- 1998/99 (Figura 5.2f): registrou-se a ocorrência de dois períodos de deficiência hídrica no início do ciclo da cultura (semeadura e início do período vegetativo, estádios I e II, respectivamente), em que a *ER* atingiu o valor zero;
- 2001/02 (Figura 5.2h): registrou-se a ocorrência de um período de deficiência hídrica no início e dois períodos na metade do ciclo da cultura, em que a *ER* atingiu o valor zero;
- 2003/04 (Figura 5.2i): registrou-se diversos pontos de deficiência hídrica a partir da metade do ciclo da cultura, em que a *ER* atingiu o valor zero;
- 2004/05 (Figura 5.2j): registrou-se diversos pontos de deficiência hídrica ao longo do ciclo da cultura, sendo que durante o estágio floração e enchimento de grãos (estádio III) ocorreu um período superior a 20 dias com deficiência hídrica, em que a *ER* chegou a atingir o valor de  $0,2 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ;
- 2006/07 (Figura 5.2k): registrou-se diversos pontos de deficiência hídrica ao longo do ciclo da cultura, sendo que durante o estágio de maturação (estádio IV) ocorreu um período de deficiência hídrica a partir da última semana de março de 2007 que se estendeu até o fim do ciclo, o que, segundo RICHART et al. (2005), é desejável do ponto de vista da realização da operação de colheita.

Contudo, é importante observar que o simples registro de déficit não implica necessariamente em penalização da produtividade. Sob este foco, FARIAS et al. (2001) utilizaram um índice de satisfação das necessidades de água (ISNA), definido como a relação entre a evapotranspiração real (*ER*) e a evapotranspiração da cultura (*ET<sub>c</sub>*), para a cultura da soja. A estimativa deste índice parte de níveis de risco hídrico, possuindo três classes, as quais dependem da relação *ER/ET<sub>c</sub>* obtida nos estádios fenológicos mais críticos ao déficit hídrico (estádios I e III). Desta forma, têm-se ISNA:

- bom:  $ER/ET_c \geq 0,65$
- regular:  $0,65 > ER/ET_c > 0,55$
- insuficiente:  $ER/ET_c \leq 0,55$



A Tabela 5.14 apresenta os ISNAs obtidos no presente estudo, para os quatro sistemas de manejo, de todas as safras analisadas, sendo os estádios fenológicos I (semeadura) e III (floração e enchimento de grãos) considerados os mais críticos à ocorrência de déficit hídrico.

É possível verificar que os sistemas de manejo (Tabela 5.14) tenderam a se comportar de maneira semelhante quanto ao suprimento das necessidades hídricas da cultura da soja, o que provavelmente ocorreu devido a não existência de diferenças significativas entre as CADs (Tabela 5.13). As safras 1991/92, 1998/99 e 2001/02 apresentaram problemas quanto ao suprimento de água durante o estágio I. BERLATO, MATZENAUER e BERGAMASCHI (1986) e EMBRAPA (2006) afirmam que isto pode proporcionar perdas na produção final, principalmente por falhas de germinação, com conseqüente redução e desuniformidade de *stand*.

**TABELA 5.14** – Índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) para a cultura da soja, considerando os estádios fenológicos I (semeadura) e III (floração e enchimento de grãos), para os quatro sistemas de manejo, nas 11 safras analisadas na região de Ponta Grossa-PR.

Safr	----- Índice de satisfação das necessidades de água* -----							
	Plantio direto		Plan. convencional		Preparo mínimo		P. D. escarificado	
	Estádio I	Estádio III	Estádio I	Estádio III	Estádio I	Estádio III	Estádio I	Estádio III
1991/92	insuficiente	bom	insuficiente	bom	insuficiente	bom	insuficiente	bom
1992/93	bom	bom	bom	bom	bom	bom	bom	bom
1994/95	bom	bom	bom	bom	bom	bom	bom	bom
1995/96	bom	bom	bom	bom	bom	bom	bom	bom
1997/98	bom	bom	bom	bom	bom	bom	bom	bom
1998/99	regular	bom	regular	bom	insuficiente	bom	insuficiente	bom
2000/01	bom	bom	bom	bom	bom	bom	bom	bom
2001/02	insuficiente	bom	insuficiente	bom	insuficiente	bom	insuficiente	bom
2003/04	bom	regular	bom	regular	bom	regular	bom	regular
2004/05	bom	regular	bom	regular	bom	regular	bom	insuficiente
2006/07	bom	bom	bom	bom	bom	bom	bom	bom

\* Segundo FARIAS et al. (2001).

Em relação à produtividade média das 11 safras empregando os quatro sistemas de manejo ( $3567,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), verificou-se que as considerações realizadas por BERLATO, MATZENAUER e BERGAMASCHI (1986) e EMBRAPA (2006) se confirmaram para as safras 1998/99 e 2001/02, que produziram  $347,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  e  $462,0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  menos, respectivamente, o que representa uma diferença significativa em termos econômicos. A produtividade da safra 2001/02 ( $3105,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) foi a menor verificada entre todas as safras analisadas. Por outro lado, o mesmo não foi observado para a safra 1991/92, que apresentou

501 kg·ha<sup>-1</sup> a mais do que a produtividade média, correspondendo a segunda maior produtividade entre as 11 analisadas.

PAULETTI et al. (2003), para esta mesma área e período, atribuíram a queda na produtividade de soja do sistema de manejo plantio direto na safra 1998/99 à alta susceptibilidade do cultivar BR 16 a doenças, dando menor ênfase ao período de seca ocorrido no estágio I de desenvolvimento da cultura. Provavelmente, as doenças foram favorecidas pelo longo período chuvoso que se estendeu de dezembro de 1998 até abril de 1999, no qual praticamente não foi registrada a ocorrência de déficit hídrico (Figura 5.2f). O longo período de chuvas gerou um ambiente com alta umidade relativa do ar (UR média de 80%), temperaturas amenas (média de 21 °C) e fonte de inóculo (da cobertura), valores propícios para incidência de doenças em altos graus de severidade.

Outro ponto interessante observado, também ocorrido na safra 1998/99 (Tabela 5.14), foi que o déficit hídrico registrado no estágio I foi semelhante nos sistemas de manejo plantio direto e plantio convencional, e menor com relação aos demais. O plantio direto e o plantio convencional tendem a apresentar taxas de infiltração de água no solo semelhantes nos estádios iniciais da cultura, devido às características inerentes a cada um dos sistemas, constituindo, assim, resultados similares entre eles. No caso do solo sob plantio convencional, o intenso preparo facilita a penetração de grande quantidade de água em um curto espaço de tempo, o que se reduz drasticamente ao longo do ciclo pela formação do selamento superficial e compactação, resultantes, principalmente, do impacto das gotas de chuva, tráfego de maquinário e acomodação dos agregados. No plantio direto, a compactação inicial dificulta que a água penetre rapidamente. Contudo, a presença da cobertura sobre o solo ajuda a manter temperatura e evita perda de grande volume de água por escoamento superficial, devido à cobertura que aumenta a rugosidade da superfície, constituindo-se em obstáculos ao escoamento. Dessa forma, a água permanece mais tempo sobre o solo, o que aumenta o volume de água infiltrado. (VEIGA e AMADO, 1994; RICHART et al., 2005; SEIXAS, ROLOFF e RALISCH, 2005).

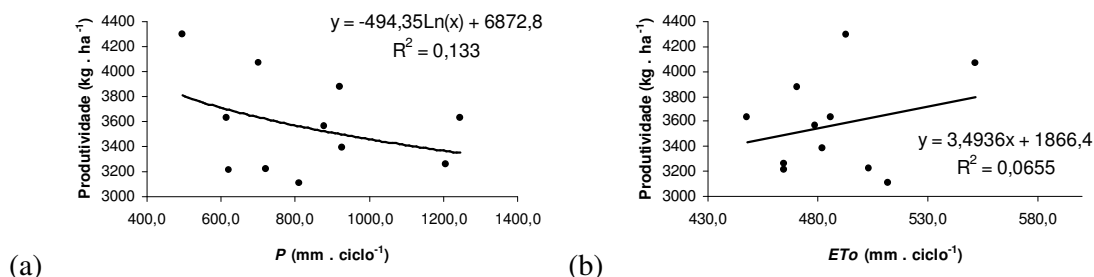
As safras 2003/04 e 2004/05 apresentaram problemas quanto ao suprimento de água durante o estágio III. MUNDSTOCK e THOMAS (2005) consideram este o período mais sensível da planta de soja à falta de água, pois os efeitos se darão sobre aborto de flores, óvulos e legumes e, posteriormente, no tamanho, vigor e qualidade dos grãos obtidos, principalmente pela restrição da disponibilidade de fotoassimilados.

Em relação às produtividades médias das 11 safras estudadas, verificou-se que as considerações feitas por MUNDSTOCK e THOMAS (2005) se confirmaram para a safra 2004/05, apresentando  $358,3 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  menos que a produtividade média, sendo a segunda menor produtividade verificada entre as safras analisadas ( $3209,3 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). No entanto, a safra 2003/04 não foi muito prejudicada, apresentando  $63,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  a mais do que a produtividade média, o que corresponde a quarta maior safra entre as safras analisadas ( $3631,0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ).

### 5.3 DESEMPENHO DE MODELOS NA ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DA SOJA, NA REGIÃO DE PONTA GROSSA-PR

#### 5.3.1 Análise de regressão e correlação, entre produtividade e parâmetros climáticos, empregando modelos simplificados

A obtenção de modelos comumente utilizados a partir de análises de regressão simples e correlação, quando possível, é uma excelente forma de realizar estimativas sobre um determinado fenômeno, baseando-se no conhecimento de apenas uma variável descritora. No entanto, a tentativa de ajustar os dados de produtividade das 11 safras da cultura da soja com parâmetros climáticos, como  $ET_o$ ,  $ET_c$ ,  $ER$ ,  $ER/ET_c$  e  $P$ , apresentaram baixíssimos coeficientes de determinação ( $R^2 < 0,14$ ) para as equações do tipo linear, potencial, exponencial, logarítmica e polinomial de segundo grau. Assim, dada à simplicidade das equações mencionadas, a existência de um provável ajustamento entre os dados de produtividade vs climáticos, seria excelente, mas não foi possível. A Figura 5.3 apresenta as duas melhores e coerentes correlações obtidas entre as 25 análises realizadas.



**FIGURA 5.3** – Análise de regressão e coeficiente de determinação obtido da relação entre produtividade média e: (a) precipitação ( $P$ ), com a equação logarítmica; e (b) evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), com a equação linear.

Os resultados obtidos esclarecem o motivo do desenvolvimento e utilização de modelos agrometeorológicos mais específicos, como os propostos por: HOWELL e HILER (1975), DOORENBOS e KASSAN (1979); STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979); RAO, SARMA e CHANDER (1988); JENSEN (1968); MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974), e DOORENBOS e KASSAN (1979) modificado por CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA (1986), entre outros; evidenciando realmente a necessidade de introdução de outros parâmetros da cultura, como o estágio fenológico, a fim de se tentar obter melhor ajustamento entre parâmetros climáticos e produtividade da cultura da soja para a região de Ponta Grossa.

### 5.3.2 Desempenho dos modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade

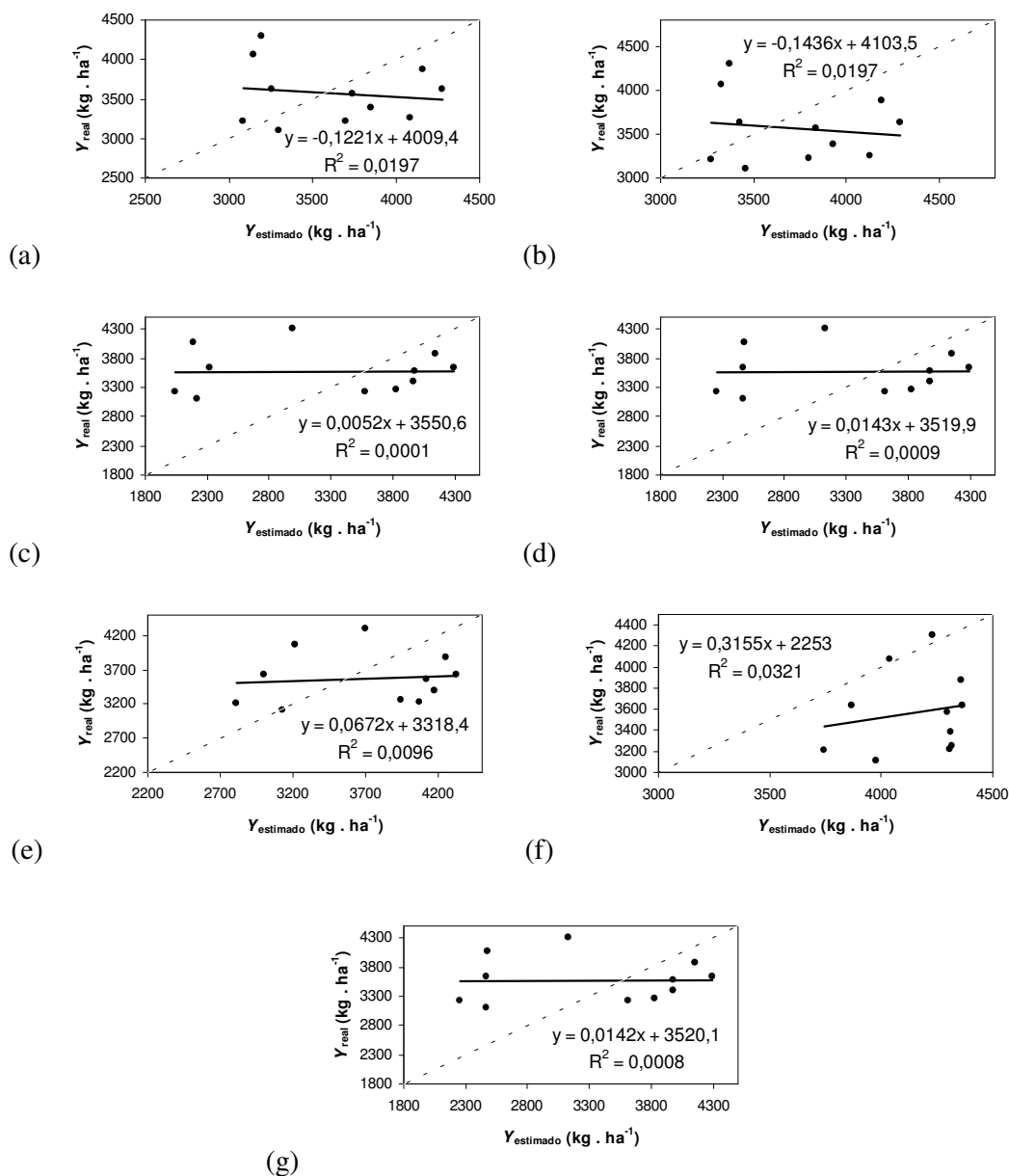
A Figura 5.4 apresenta a análise de regressão linear entre os valores reais de produtividade da cultura da soja e estimados com os sete modelos agrometeorológicos testados. As equações dos modelos agrometeorológicos testados estão apresentados na Tabela 4.1 do item Material e Métodos. A Tabela 5.15 apresenta os valores dos coeficientes ou fatores recomendados na bibliografia para serem utilizados nos referidos modelos.

**TABELA 5.15** – Coeficientes ou fatores obtidos na bibliografia e utilizados nos seis modelos agrometeorológicos testados no presente estudo para a cultura da soja, na região de Ponta Grossa-PR.

Modelo *	Coeficiente ou fator	Estádios				Todo o ciclo	Obtenção do coeficiente ou fator
		I	II	III	IV		
b	$ky$	—	—	—	—	0,85	DOORENBOS e KASSAN (1979)
c	$ky_i$	0,2	0,2	1,0	0,2	—	DOORENBOS e KASSAN (1979)
d	$ky_i$	0,2	0,2	1,0	0,2	—	DOORENBOS e KASSAN (1979)
e	$\lambda$	0,0	0,129	0,779	0,0	—	BERLATO (1987)
f	$\lambda$	0,0	0,129	0,779	0,0	—	BERLATO (1987)
g	$ke$	0,0	0,0	0,1	0,1	—	CAMARGO et al. (1986)
	$ky_i$	0,2	0,2	1,0	0,2	—	DOORENBOS e KASSAN (1979)

\* As letras correspondem aos modelos descritos no título da Figura 5.4.

De forma geral, os modelos agrometeorológicos não retornaram satisfatoriamente valores de produtividade equivalentes aos valores reais de produtividade registrados. O melhor coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,0321$ ) foi encontrado com o modelo de MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974) e foi baixíssimo. Os resultados encontrados com os modelos agrometeorológicos foram inferiores aos alcançados com os modelos simplificados.



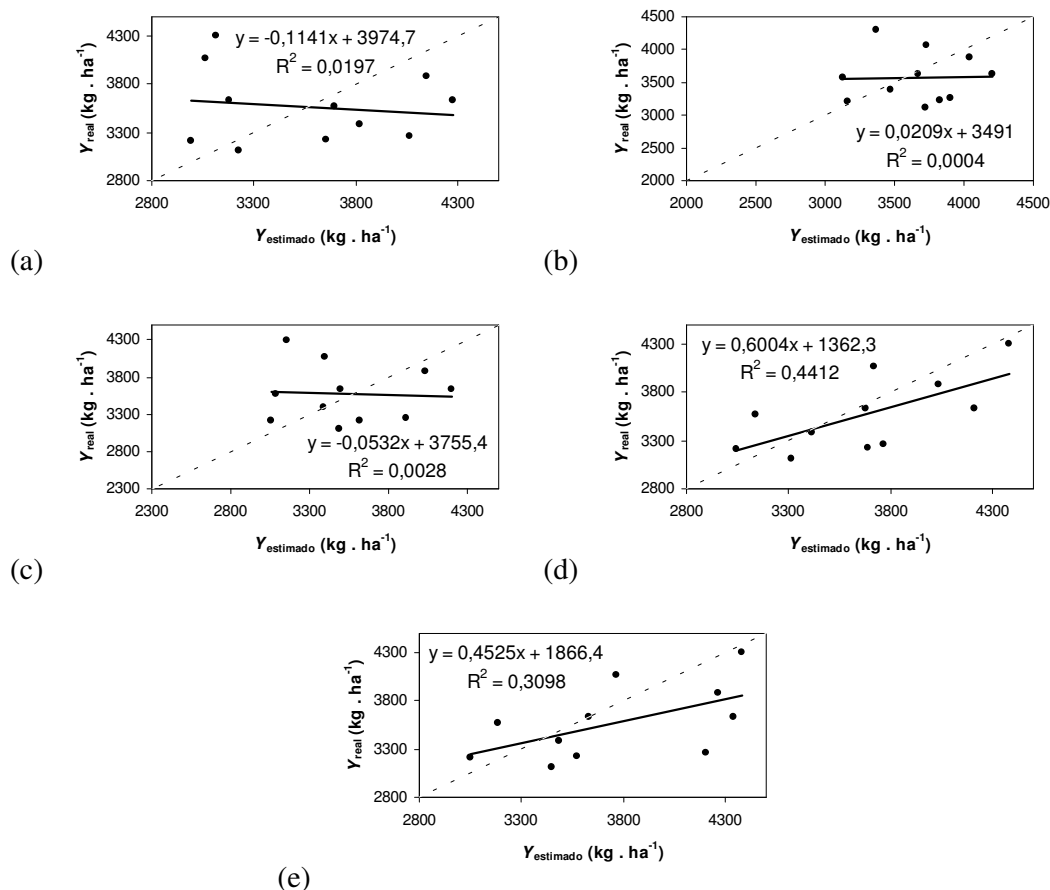
**FIGURA 5.4** – Análise de regressão linear entre os valores reais de produtividade da cultura da soja e estimados com os modelos de: (a) HOWELL e HILER (1975) (b) DOORENBOS e KASSAN (1979); (c) STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979); (d) RAO, SARMA e CHANDER (1988); (e) JENSEN (1968); (f) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974), e (g) DOORENBOS e KASSAN (1979) modificado por CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA (1986), empregando os coeficientes ou fatores obtidos na bibliografia para as 11 safras estudadas.

Os resultados obtidos até o momento no presente trabalho (Figuras 5.3 e 5.4) diferiram dos alcançados por MORAES et al. (1998), que utilizando os mesmos coeficientes obtidos na literatura, obtiveram bons resultados nos testes realizados com os modelos agrometeorológicos de DOORENBOS e KASSAN (1979), STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979), DOORENBOS e KASSAN (1979) modificado por CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA (1986) e RAO, SARMA e CHANDER (1988) para a estimativa da produtividade da cultura da soja, na região de Ribeirão Preto. MORAES et al. (1998) verificaram desempenho satisfatório dos modelos na estimativa da produtividade dos três cultivares testados, sendo que o modelo DOORENBOS e KASSAN (1979) modificado por CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA (1986) apresentou desempenho superior aos demais.

Diante de resultados insatisfatórios, outro procedimento adotado por diversos autores (BERLATO, 1987; PICINI, 1998; CAMARGO et al., 1999; FONTANA et al., 2001; MARTINS e ORTOLANI, 2006) consiste na realização do ajuste estatístico dos coeficientes ou fatores dos modelos agrometeorológicos. BERLATO (1987) relata que diferenças entre as cultivares, manejo, tipo de solo, fertilidade, clima, entre outros, variam de região para região, e até dentro da mesma região. Desta forma, o autor salienta a importância da calibração de coeficientes ou fatores para cada localidade, o que possibilita a obtenção de estimativas mais precisas de produtividade por meio de modelos agrometeorológicos. Dentro deste contexto, o item disposto a seguir apresenta uma série de tentativas de ajuste de fatores e coeficientes de modelos agroclimatológicos ( $ky$ ,  $ky_i$  e  $\lambda$ ), a fim de obter melhores estimativas da produtividade para a cultura da soja, na região de Ponta Grossa-PR.

#### 5.4 AJUSTE DOS COEFICIENTES $ky$ , $ky_i$ E FATOR $\lambda$ , PARA A CULTURA DA SOJA, NA REGIÃO DE PONTA GROSSA-PR

Considerando os coeficientes ou fatores ajustados estatisticamente no presente trabalho, a Figura 5.5 apresenta os resultados da análise de regressão linear e correlação entre as produtividades reais da cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR e estimadas com os modelos: DOORENBOS e KASSAN (1979); STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979); RAO, SARMA e CHANDER (1988), JENSEN (1968) e MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974).



Legenda:							
Modelo	Coefficiente ou fator	Estádios				Todo o ciclo	Obtenção do coeficiente ou fator
		I	II	III	IV		
a	$ky$	—	—	—	—	1,0698	Regressão simples
b	$ky_i$	-0,4069	0,9289	-0,7597	-0,3665	—	Regressão múltipla
c	$ky_i$	-0,4069	0,9289	-0,7597	-0,3665	—	Regressão múltipla
d	$\lambda$	-0,3003	0,8700	1,0515	-0,6546	—	Regressão múltipla
e	$\lambda$	-0,2701	2,6341	2,5130	-1,0906	—	Regressão múltipla

**FIGURA 5.5** – Análise de regressão linear entre os valores reais de produtividade da cultura da soja e estimados com os modelos de: (a) DOORENBOS e KASSAN (1979); (b) STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979); (c) RAO, SARMA e CHANDER (1988); (d) JENSEN (1968); e, (e) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974), empregando os coeficientes ou fatores ajustados a partir de análise de regressão, considerando as 11 safras estudadas.

Apesar da melhoria dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos na regressão linear com as produtividades estimadas com os modelos de MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974) ( $R^2 = 0,4412$ ) e JENSEN (1968) ( $R^2 = 0,3098$ ), verificou-se que os resultados ainda permaneceram estatisticamente inferiores ao que se deseja experimentalmente em cultivos agrícolas. FERREIRA (1991) considera que valores confiáveis de  $R^2$  devem ser iguais ou superiores a 0,7. Este fato evidenciou que somente o ajuste dos valores de  $ky$ ,  $ky_i$  e  $\lambda$  para a cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, considerando a produtividade real, evapotranspiração relativa ( $ER/ET_o$ ) e estádios de desenvolvimento da cultura da soja nas 11 safras analisadas, não foram suficientes para gerar bons resultados com as cinco equações que permitem ajuste dentre as sete testadas.

Mesmo com os ajustes realizados, verificou-se também que os resultados obtidos continuam diferindo dos alcançados por MORAES et al. (1998), que obteve melhores resultados utilizando coeficientes ou fatores recomendados na bibliografia.

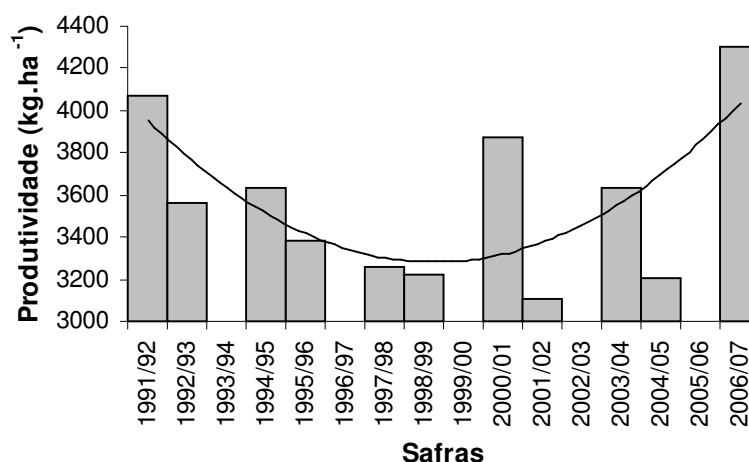
Trabalhando com a parametrização e validação do modelo de JENSEN (1968) para uma microrregião produtora de soja do Estado do Rio Grande do Sul, FONTANA et al. (2001) obtiveram resultados diferentes aos do presente trabalho. O modelo foi ajustado na forma completa (para todos os meses em que a cultura se encontrava no campo), e na forma reduzida (nos meses em que a sensibilidade da cultura ao fator hídrico era maior). Os autores obtiveram correlação significativa entre rendimento estimado e observado para ambos os modelos (completo:  $r = 0,85$  e reduzido:  $r = 0,79$ ), concluindo que estes podem ser utilizados na estimativa do rendimento da soja da microrregião em estudo. A forma reduzida tem caráter preditivo e pode ser incorporada a programas de previsão de safras.

## 5.5 CONSIDERAÇÃO DO COMPORTAMENTO TEMPORAL DA PRODUTIVIDADE NA REGIÃO DE PONTA GROSSA

Os resultados obtidos nos Itens 5.3 e 5.4 evidenciaram a existência de um ou mais fatores ambientais que provavelmente interferiram e ocultaram a dependência que a produtividade real da cultura da soja tem quanto ao suprimento adequado de sua necessidade hídrica, em seus estádios fenológicos, na região de Ponta Grossa-PR. Diante deste fato, inúmeras tentativas visando encontrar possíveis variáveis interferindo no processo produtivo foram realizadas. Os subitens a seguir apresentam os resultados promissores obtidos simplesmente a partir da constatação e consideração de uma tendência temporal da produtividade na região em estudo.



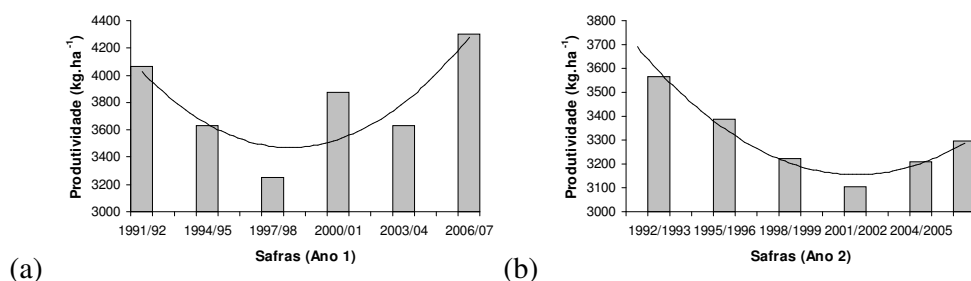
A Figura 5.6 apresenta a disposição temporal dos valores reais médios de produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR, considerando a média dos quatro sistemas de manejo, para as 11 safras analisadas. Trabalhou-se com a média de produtividade dos quatro sistemas de manejo em cada *j*-ésima safra porque a análise estatística não revelou diferença significativa a 5% de erro entre elas.



**FIGURA 5.6** – Disposição temporal dos valores reais médios de produtividade da cultura da soja (média dos quatro sistemas de manejo), para a região de Ponta Grossa-PR.

Os dados apresentados na Figura 5.6 permitiram verificar que durante o ciclo de rotação de culturas existe uma alternância entre as produtividades da cultura da soja. Dentro da rotação de culturas, observou-se para as safras de soja em anos consecutivos, que a produtividade da cultura foi sempre maior no primeiro ano em relação ao segundo. Em média, houve uma diferença de +10,31% na produtividade da soja no primeiro ano em comparação com o segundo. Diante deste fato optou-se por realizar a separação das produtividades da soja em dois grupos, denominados: **(a) “Ano 1”**: considerou somente as produtividades referentes à primeira safra de soja após a rotação de culturas (safras: 1991/92, 1994/95, 1997/98, 2000/01, 2003/04, 2006/07); e, **(b) “Ano 2”**: considerou apenas as produtividades referentes à segunda safra de soja após a rotação de culturas (safras: 1992/93, 1995/96, 1998/99, 2001/02, 2004/05). As safras 1990/91, 1993/94, 1996/97, 1999/00, 2002/03 e 2005/06 foram cultivadas com outras culturas.

A Figura 5.7 apresenta a disposição temporal obtida a partir das produtividades da soja em dois grupos (“Ano 1” e “Ano 2”).



**FIGURA 5.7** – Disposição temporal dos valores reais médios de produtividade da cultura da soja (média dos quatro sistemas de manejo), para a região de Ponta Grossa-PR, considerando o agrupamento das produtividades nas safras como: (a) “Ano 1”; e, (b) “Ano 2”.

A disposição das produtividades conforme apresentado na Figura 5.7 evidenciou melhoria na tendência dos dados. Este fato confirma as considerações dispostas anteriormente e evidenciaram que algum fator (fitossanitário, nutricional, operacional, entre outros) pode estar favorecendo as produtividades “Ano 1” ou afetando as produtividades “Ano 2”.

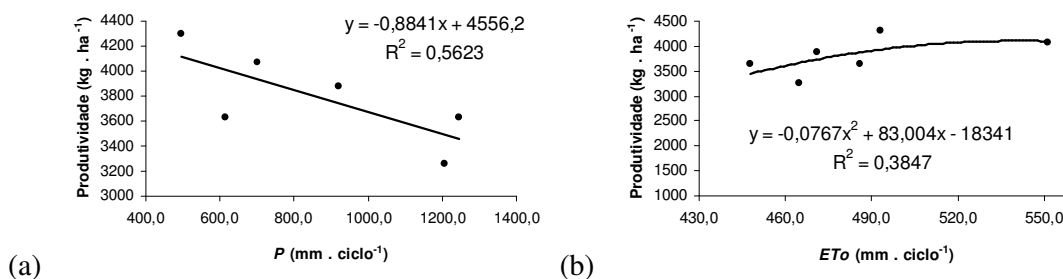
Um cultivar em uso por vários anos o torna popular junto aos agricultores, o que propicia elevada pressão de seleção sobre os patógenos prevalentes na região. Este fato pode levar a alterações na frequência de genes do patógeno e resultar na vulnerabilidade desse cultivar, promovendo, conseqüente, “quebra” da resistência mediante o surgimento de nova raça virulenta capaz de infectar cultivares considerados resistentes em anos anteriores (CAMARGO, 1995; CAMARGO e BERGAMIN FILHO, 1995). Assim, a sequência de quedas de produtividade observadas no período entre as safras 1991/92 e 1998/99, pode ter ocorrido devido à utilização do mesmo cultivar – no caso específico, cultivar BR 16.

Além disso, a queda da produção nas safras “Ano 2” com relação às safras “Ano 1” pode ser explicada pelo fato de que a explosão populacional de pragas e a incidência de doenças dependem basicamente da disponibilidade de alimento e de fatores climáticos, particularmente do regime de chuvas. Como as pragas e alguns patógenos também conseguem se desenvolver em outras espécies alternativas, ou mesmo nos restos culturais sobre o solo, elas têm alimento o ano todo, facilitando a ocorrência de gerações sucessivas (BIANCO, 2005). Existem patógenos, como *Sclerotinia* spp., que produzem estruturas de resistência capazes de sobreviver por longos períodos no solo (AMORIM, 1995). Desta forma, quando se realiza duas safras consecutivas de uma mesma espécie, a probabilidade de ocorrência de ataques mais severos de pragas e doenças aumenta consideravelmente.

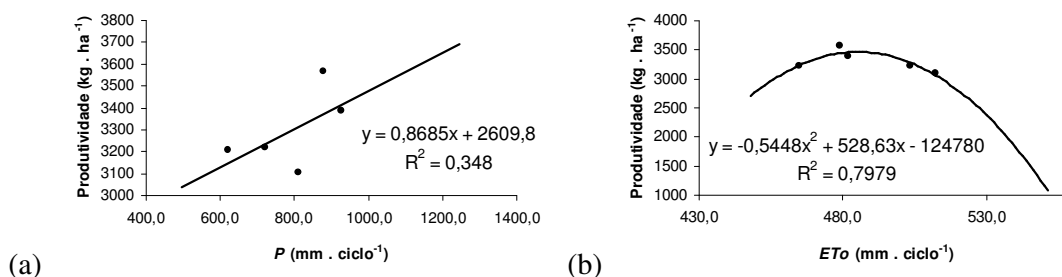
Os resultados apresentados na Figura 5.7 evidenciaram que as produtividades “Ano 1” (Figura 5.7a) tiveram maior variabilidade que as produtividades “Ano 2” (Figura 5.7b), com coeficiente de variação igual a 9,73% e 5,47%, respectivamente. Este fato, conforme será mostrado posteriormente, indicou existência de maior dificuldade para se obter ajustes estreitos nas análises de regressão visando estimar produtividades “Ano 1”.

#### 5.5.1 Análise de regressão e correlação, entre produtividade (“Ano 1” e “Ano 2”) e parâmetros climáticos, empregando modelos simplificados

Diante dos bons resultados obtidos com as produtividades “Ano 1” e “Ano 2”, uma nova tentativa de ajuste com modelos simplificados foi realizada. Desta forma, foram realizadas análises de regressão (linear, potencial, logarítmica, exponencial e polinomial de segundo grau) e correlações entre as produtividades (“Ano 1” e “Ano 2”) e os respectivos valores de  $ER$ ,  $ET_c$ ,  $ER/ET_c$  e  $P$ . As Figuras 5.8 e 5.9 apresentaram as duas melhores análises de regressão e correlações obtidas nos agrupamentos de produtividade real “Ano 1” e “Ano 2”, respectivamente, obtidos das 50 análises realizadas (dois agrupamentos, cinco equações e cinco parâmetros climáticos).



**FIGURA 5.8** – Análise de regressão e coeficiente de determinação obtido da relação entre produtividade média do agrupamento “Ano 1” e: (a) precipitação ( $P$ ) (equação linear); (b) evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) (equação polinomial de segundo grau).

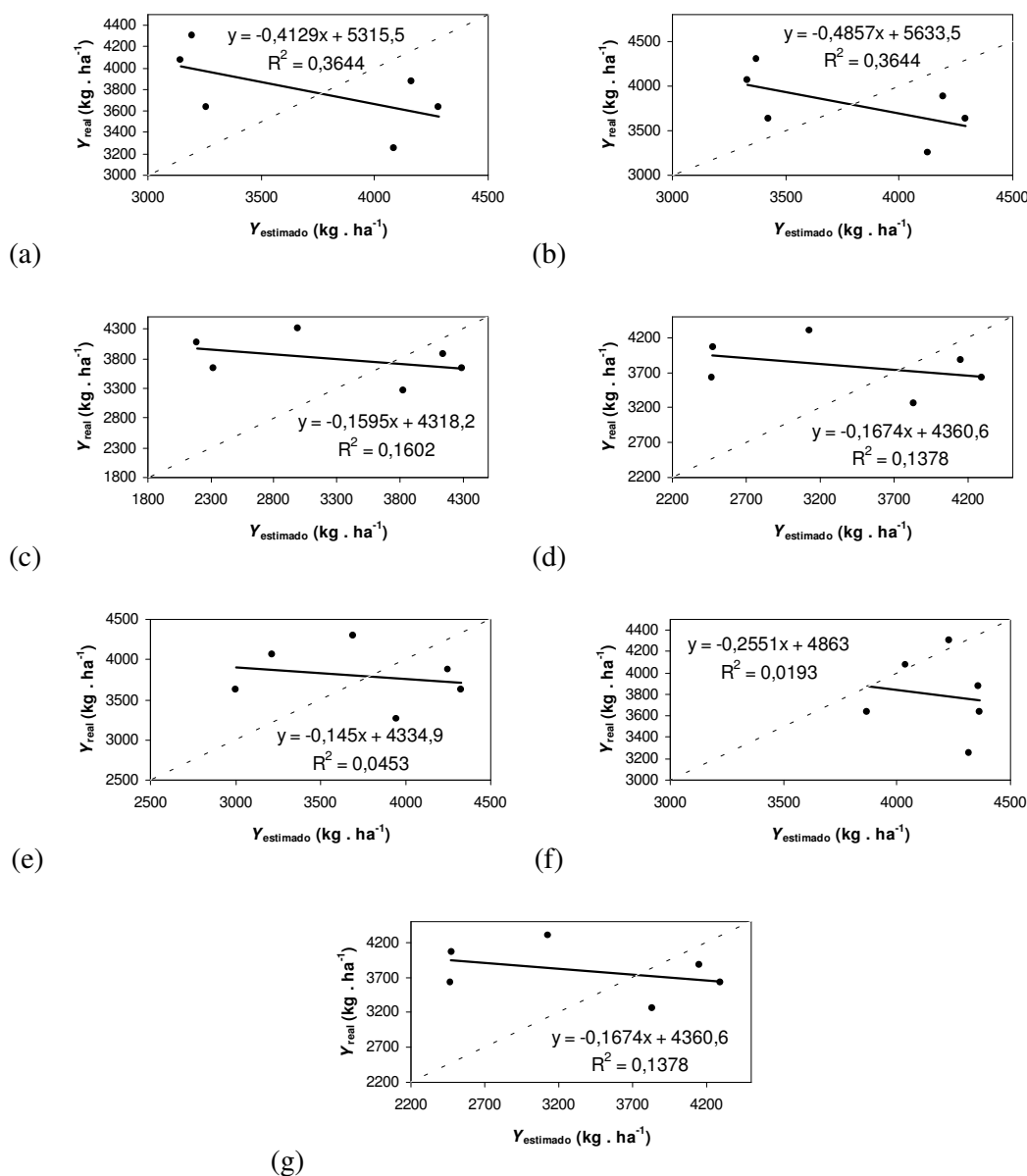


**FIGURA 5.9** – Análise de regressão e coeficiente de determinação obtido da relação entre produtividade média do agrupamento “Ano 2” e: (a) precipitação ( $P$ ) (equação linear); e, (b) evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) (equação polinomial de segundo grau).

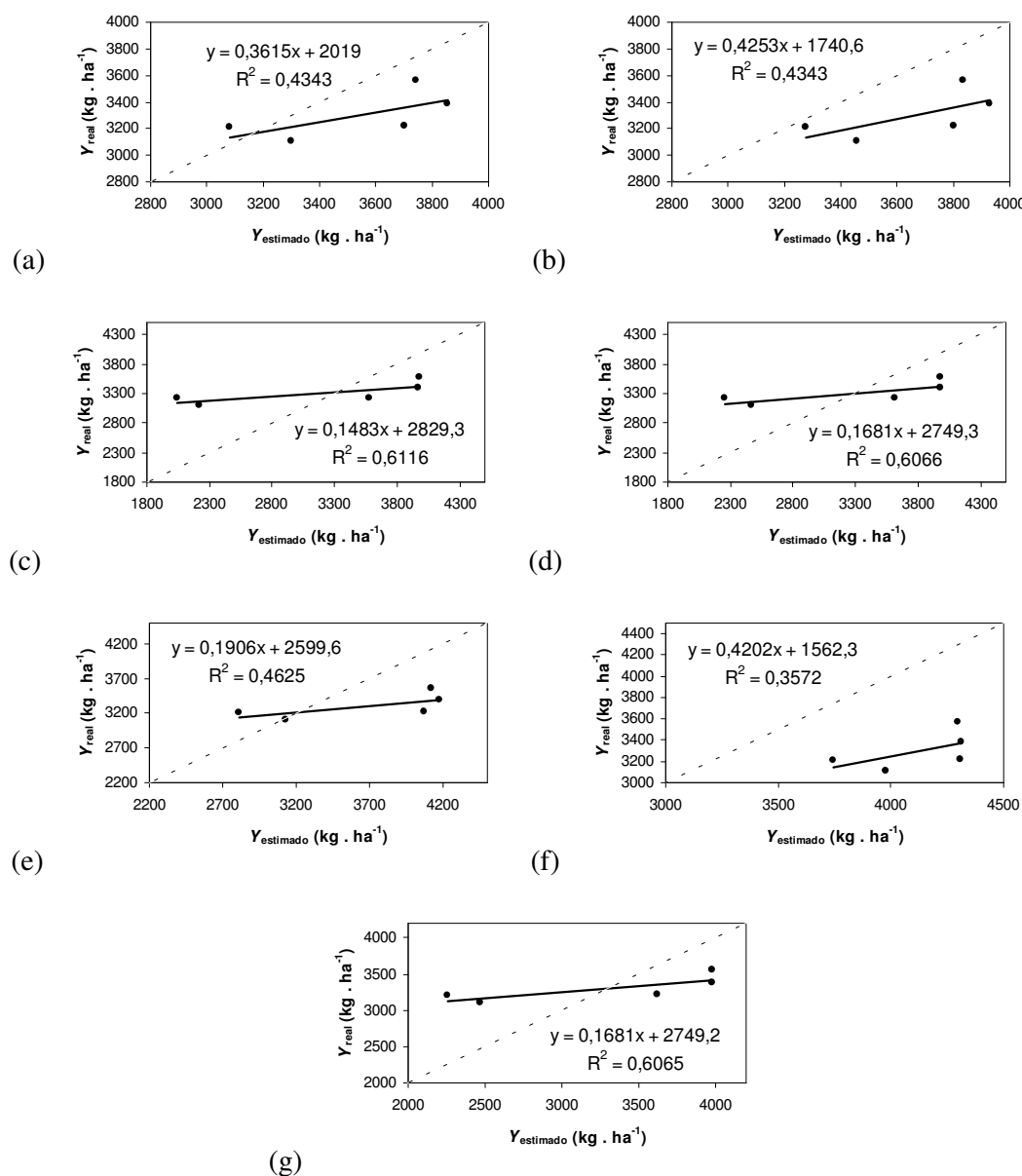
Uma comparação entre os resultados dispostos nas Figuras 5.8 e 5.9 com os apresentados nas Figuras 5.3 a 5.5, evidenciaram, em função na nova disposição de agrupamento dos dados de produtividade (“Ano 1” e “Ano 2”), que os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) melhoraram consideravelmente. No entanto, as relações estudadas ainda não foram estatisticamente satisfatórias, apresentando coeficiente de determinação ( $R^2$ ) abaixo do recomendado por FERREIRA (1991), em que valores confiáveis de  $R^2$  para a área de ciências agrárias devem ser iguais ou superiores a 0,7.

5.5.2 Análise de regressão linear e correlação, entre produtividade real e estimada (“Ano 1” e “Ano 2”), empregando modelos agrometeorológicos, utilizando fatores e coeficientes recomendados na literatura

As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam as análises de regressão linear entre os valores reais de produtividade da cultura da soja, conforme os agrupamentos “Ano 1” e “Ano 2”, respectivamente, e os valores estimados com os sete modelos agrometeorológicos testados. As equações dos modelos agrometeorológicos testados e os valores dos coeficientes ou fatores recomendados na bibliografia, encontram-se apresentados na Tabelas 4.1 (Material e Métodos) e Tabela 5.15, respectivamente.



**FIGURA 5.10** – Análise de regressão linear entre os valores reais de produtividade da cultura da soja agrupados conforme “Ano 1” e estimados com os modelos de: (a) HOWELL e HILER (1975) (b) DOORENBOS e KASSAN (1979); (c) STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979); (d) RAO, SARMA e CHANDER (1988); (e) JENSEN (1968); (f) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974), e (g) DOORENBOS e KASSAN (1979) modificado por CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA (1986), empregando os coeficientes ou fatores obtidos na bibliografia (Tabela 5.15).



**FIGURA 5.11** – Análise de regressão linear entre os valores reais de produtividade da cultura da soja agrupados conforme “Ano 2” e estimados com os modelos de: (a) HOWELL e HILER (1975) (b) DOORENBOS e KASSAN (1979); (c) STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979); (d) RAO, SARMA e CHANDER (1988); (e) JENSEN (1968); (f) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974), e (g) DOORENBOS e KASSAN (1979) modificado por CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA (1986), empregando os coeficientes ou fatores obtidos na bibliografia (Tabela 5.15).

Os resultados obtidos (Figuras 5.10 e 5.11) com os coeficientes ou fatores recomendados na bibliografia (Tabela 5.15), quando comparados aos resultados apresentados na Figura 5.4, evidenciaram melhoras significativas no coeficiente de determinação ( $R^2$ ), principalmente para as análises realizadas considerando as produtividades “Ano 2”. Os modelos de STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979), RAO, SARMA e CHANDER (1988) e DOORENBOS e KASSAN (1979) modificado por CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA (1986), apresentaram coeficientes de determinação aproximadamente iguais ( $R^2 \cong 0,6$ ) para as produtividades “Ano 2”. No entanto, os resultados da Figura 5.10, que considera as produtividades “Ano 1” ainda não são satisfatórios estatisticamente. Os melhores coeficientes de determinação ( $R^2 = 0,3644$ ) foram obtidos para os modelos de HOWELL e HILER (1975) e DOORENBOS e KASSAN (1979), que por sua vez, não foram os modelos que proporcionaram os melhores resultados com as produtividades “Ano 2”. Além disso, os resultados obtidos ainda apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) inferiores aos recomendados por FERREIRA (1991).

Não foi possível, mas foi válida a tentativa de se obter  $R^2 > 0,7$  nas análises de regressão linear, empregando os coeficientes obtidos na bibliografia, para estimar as produtividades (“Ano 1” e “Ano 2”) nos sete modelos testados. Os coeficientes ou fatores recomendados por DOORENBOS e KASSAN (1979), CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA (1986) e BERLATO (1987) são muito utilizados em diversos trabalhos apresentados na literatura. A obtenção de boas análises de correlação a partir destes mesmos coeficientes ou fatores poderia facilitar e favorecer a obtenção de uma padronização. Desta forma, conforme será mostrado posteriormente, prevaleceram às considerações de BERLATO (1987), afirmando que a calibração de coeficientes ou fatores para cada localidade pode permitir a obtenção de estimativas mais precisas de produtividade por meio de modelos agrometeorológicos.

A discrepância entre os resultados encontrados nas Figuras 5.10 e 5.11 do presente estudo com relação aos apresentados por MORAES et al. (1998) pode ter ocorrido devido:

- As diferenças ambientais existentes entre as localidades, ou seja, diferenças entre os solos, os climas, ocorrência de pragas, entre outros;
- A utilização de diferentes cultivares entre os estudos, o que acarreta em diferenças de adaptabilidade à região, capacidade produtiva, duração de ciclo, entre outros;

- No trabalho de MORAES et al. (1998), a profundidade efetiva do sistema radicular ( $z$ ) da soja foi mantida fixa em valores altos, assim como os valores de  $CAD$ . Desta maneira, o balanço hídrico só retorna valores de deficiência hídrica quando os períodos de estiagem forem prolongados. Este fato faz com que o modelo agrometeorológico não penalize a produção pelo déficit hídrico tantas vezes, como ocorreu no presente estudo, onde os valores de  $z$  e  $CAD$  variaram de acordo com o desenvolvimento da cultura;
- As diferentes metodologias utilizadas para a obtenção da  $ET_o$ . No presente trabalho a  $ET_o$  foi estimada a partir de dados meteorológicos diários, seguindo a metodologia de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), ao passo que MORAES et al. (1998) empregaram a metodologia de THORNTHWAITE e MATHER (1955), em escala decendial;
- A produtividade potencial do trabalho de MORAES et al. (1998) ter advindo de um modelo matemático e não de dados experimentais.

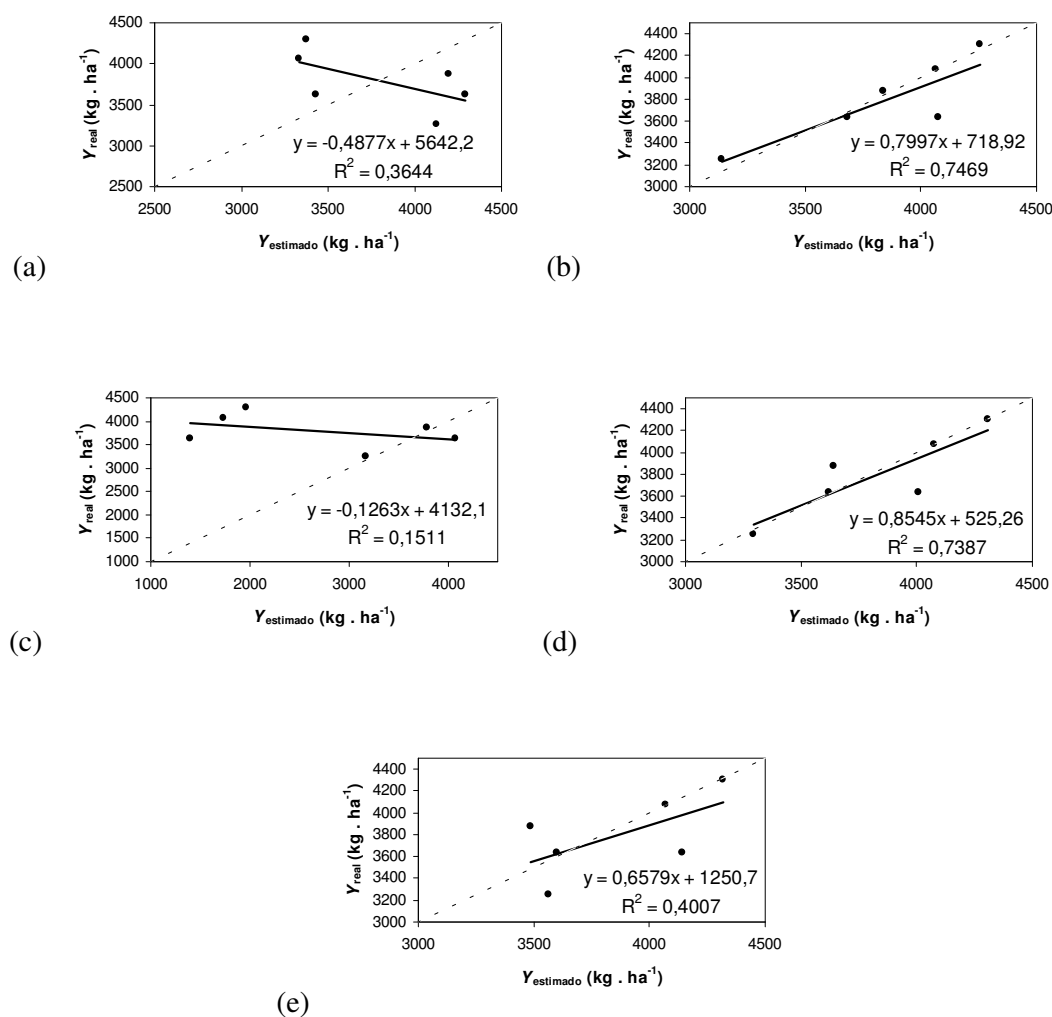
### 5.5.3 Análise de regressão linear e correlação, entre produtividade real e estimada (“Ano 1” e “Ano 2”), empregando modelos agrometeorológicos, utilizando fatores e coeficientes ajustados com os dados da região de Ponta Grossa-PR

As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam a análise de regressão linear entre os valores reais de produtividade da cultura da soja, conforme os agrupamentos “Ano 1” e “Ano 2”, respectivamente, e os valores estimados com os cinco modelos agrometeorológicos testados, empregando os coeficientes ou fatores ajustados.

As análises de regressão linear e correlação, entre produtividade real e estimada (“Ano 1” e “Ano 2”), empregando modelos agrometeorológicos com fatores e coeficientes ajustados, apresentaram resultados satisfatórios para os modelos de STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979) e JENSEN (1968). Os dois modelos apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) acima de 0,7, tanto para as análises considerando as safras “Ano 1” como “Ano 2”. Desta forma os resultados obtidos atenderam as recomendações de FERREIRA (1991), mostrando-se agronomicamente aplicáveis à realização de estimativas da produtividade na região de Ponta Grossa-PR.

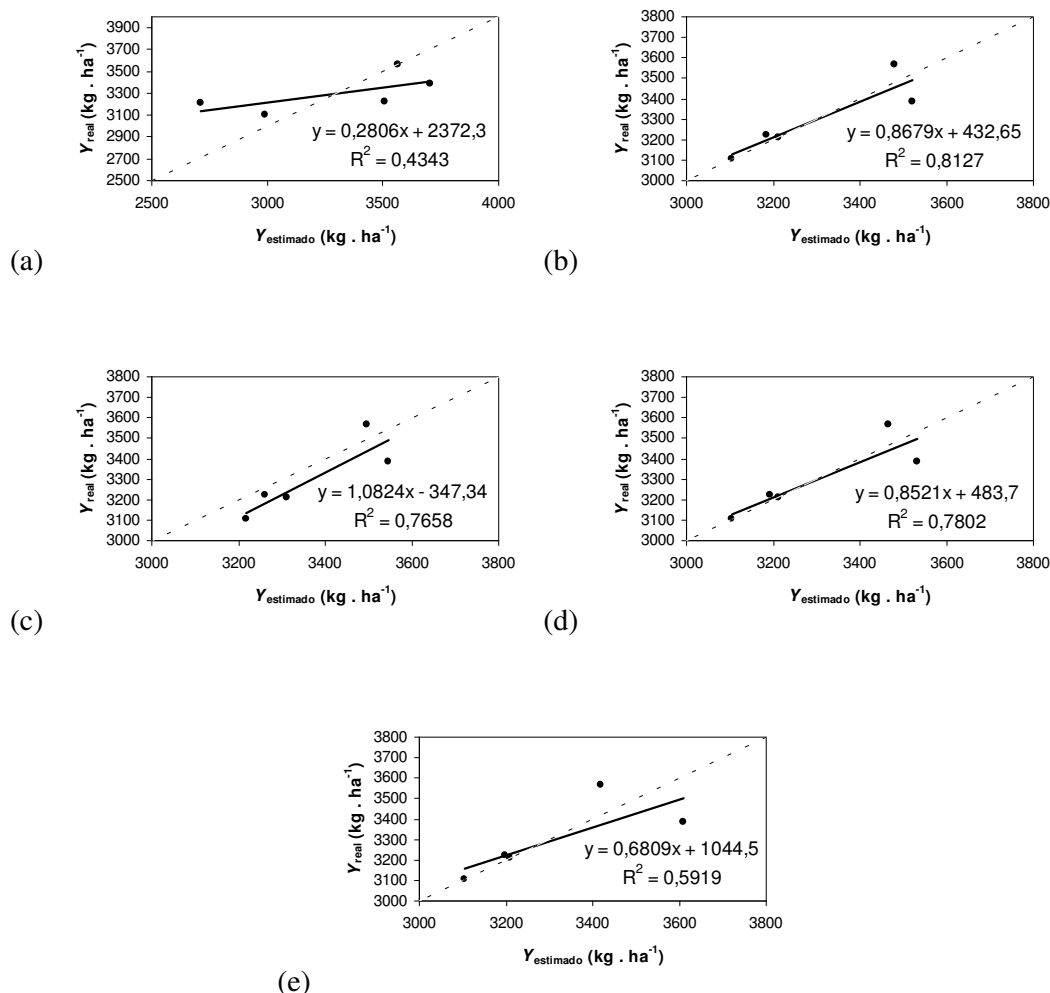
Na Figura 5.13c é possível observar que o modelo RAO, SARMA e CHANDER (1988) também apresentou um desempenho satisfatório ( $R^2 = 0,7658$ ). Contudo, o modelo obteve desempenho significativamente inferior para as safras “Ano 1” (Figura 5.12c), apresentando coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,1511.





Legenda:							
Modelo	Coeficiente ou fator	Estádios				Todo o ciclo	Obtenção do coeficiente ou fator
		I	II	III	IV		
a	$ky$	—	—	—	—	0,8465	Regressão simples
b	$ky_i$	-1,3211	1,8854	2,1174	-1,6562	—	Regressão múltipla
c	$ky_i$	-1,3211	1,8854	2,1174	-1,6562	—	Regressão múltipla
d	$\lambda$	-0,8143	2,1593	1,9570	-1,4851	—	Regressão múltipla
e	$\lambda$	-3,1565	26,5710	13,8241	-10,3268	—	Regressão múltipla

**FIGURA 5.12** – Análise de regressão linear entre os valores reais de produtividade da cultura da soja e estimados com os modelos de: (a) DOORENBOS e KASSAN (1979); (b) STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979); (c) RAO, SARMA e CHANDER (1988); (d) JENSEN (1968); e, (e) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974), empregando os coeficientes ou fatores ajustados a partir de análise de regressão, considerando as safras do agrupamento “Ano 1”.



Legenda:							
Modelo	Coefficiente ou fator	Estádios				Todo o ciclo	Obtenção do coeficiente ou fator
		I	II	III	IV		
a	$k_y$	—	—	—	—	1,2884	Regressão simples
b	$k_{y_i}$	0,2203	0,5419	0,1609	0,3008	—	Regressão múltipla
c	$k_{y_i}$	0,2203	0,5419	0,1609	0,3008	—	Regressão múltipla
d	$\lambda$	0,2037	0,5112	0,1041	0,3508	—	Regressão múltipla
e	$\lambda$	0,4924	2,0089	0,4135	1,2331	—	Regressão múltipla

**FIGURA 5.13** – Análise de regressão linear entre os valores reais de produtividade da cultura da soja e estimados com os modelos de: (a) DOORENBOS e KASSAN (1979); (b) STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979); (c) RAO, SARMA e CHANDER (1988); (d) JENSEN (1968); e, (e) MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974), empregando os coeficientes ou fatores ajustados a partir de análise de regressão, considerando as safras do agrupamento “Ano 2”.

Os resultados obtidos no presente estudo com o modelo de RAO, SARMA e CHANDER (1988) diferiram dos encontrados por CORAL et al. (2005), quando testaram o mesmo modelo para a estimativa da produtividade da soja em escala municipal e estadual no Estado do Paraná, nos anos de 1995 a 2000. Foram realizadas simulações para nove períodos de semeadura, em três classes texturais de solo (arenoso, médio e argiloso) e dois ciclos de cultura (precoce e tardio). Ao final, foi constatado que o modelo apresentou alto  $R^2$  (0,9162) entre as produtividades medidas e estimadas.

Contudo, por não apresentar resultados satisfatórios estatisticamente para os dois agrupamentos de safras (“Ano 1” e “Ano 2”) no presente estudo, considerou-se o desempenho do modelo RAO, SARMA e CHANDER (1988) não satisfatório para a estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa-PR.

Os resultados satisfatórios dos modelos STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979) e JENSEN (1968), obtidos após a disposição dos valores reais de produtividade da cultura da soja em dois agrupamentos (“Ano 1” e “Ano 2”) e empregando os coeficientes ou fatores ajustados nos cinco modelos agrometeorológicos testados, também foram confirmados com o índice “ $d$ ” de concordância de WILLMOTT et al. (1985). Os valores podem ser vistos na Tabela 5.16, que apresenta o índice “ $d$ ” obtido no presente trabalho para todas as análises realizadas anteriormente com os modelos agrometeorológicos. Os dois modelos mencionados foram os únicos que apresentaram índice “ $d$ ” maior que 0,92 nas tentativas de ajustamento com os dados de produtividade real agrupadas em “Ano 1” e “Ano 2”. Os resultados são importantes, pois foram confirmados por uma metodologia empregada em diversos trabalhos (MORAES et al., 1998; PICINI, 1998; CAMARGO et al., 1999; CARVALHO et al., 2003; MARTINS e ORTOLANI, 2006) que também visavam avaliar a exatidão da estimativa da produtividade de culturas por modelos agrometeorológicos.

Assim, em função dos resultados obtidos nas inúmeras análises realizadas, a Tabela 5.17 apresenta os modelos de melhor desempenho para estimar a produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa; seguidos de seus coeficientes e fatores ajustados.

Os resultados obtidos após o ajuste do modelo de JENSEN (1968) foram semelhantes aos obtidos por FONTANA et al (2001), os quais obtiveram um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,7225 para o modelo ajustado na forma completa. No presente trabalho os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos corresponderam a 0,7387 e 0,7802 para as análises com as safras “Ano 1” e “Ano 2”, respectivamente.

**TABELA 5.16** – Índice “d” de concordância de WILLMOTT et al. (1985) dos sete modelos empregados para estimar a produtividade da cultura da soja, na região de Ponta Grossa-PR.

Modelo	Coef. ou Fator	Obtenção do coeficiente ou fator	Índice “d”		
			Todas	“Ano 1”	“Ano 2”
HOWELL e HILER (1975)	—	—	0,3477	0,1203	0,5843
DOORENBOS e KASSAN (1979)	$ky$	DOORENBOS e KASSAN (1979)	0,3040	0,1177	0,4927
		Regressão simples	0,3572	0,1179	0,6619
STEWART, HAGAN e PRUITT (1977) e proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979)	$ky_i$	DOORENBOS e KASSAN (1979)	0,3445	0,1202	0,4460
		Regressão múltipla	0,3930	0,9255	0,9477
RAO, SARMA e CHANDER (1988)	$ky_i$	DOORENBOS e KASSAN (1979)	0,3725	0,1373	0,4984
		Regressão múltipla	0,3595	0,1522	0,8710
JENSEN (1968)	$\lambda$	BERLATO (1987)	0,4288	0,2030	0,4531
		Regressão múltipla	0,7939	0,9277	0,9375
MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974)	$\lambda$	BERLATO (1987)	0,4247	0,4062	0,2835
		Regressão múltipla	0,6987	0,7952	0,8649
DOORENBOS e KASSAN (1979) modificado por CAMARGO, BRUNINI e MIRANDA (1986)	$ky_i$	DOORENBOS e KASSAN (1979)	0,3724	0,1373	0,4984
	$ke$	CAMARGO et al. (1986)			

**TABELA 5.17** – Equação, coeficientes, fatores e coeficiente de determinação dos modelos de melhor desempenho para estimar a produtividade da cultura da soja, na região de Ponta Grossa-PR.

Modelo	Equação	Estádio	Coef. / Fator		R <sup>2</sup>	
			“Ano 1”	“Ano 2”	“Ano 1”	“Ano 2”
STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979)	$\frac{Y_r}{Y_p} = 1 - \left[ \sum_{i=1}^n ky_i \cdot \left( 1 - \frac{ER}{ETc} \right)_i \right]$	I	– 1,3211	– 0,8143	0,7469	0,8127
		II	1,8854	2,1593		
		III	2,1174	1,9570		
		IV	– 1,6562	– 1,4851		
JENSEN (1968)	$\frac{Y_r}{Y_p} = \prod_{i=1}^n \left( \frac{ER}{ETc} \right)_i^{\lambda_i}$	I	0,2203	0,2037	0,7387	0,7802
		II	0,5419	0,5112		
		III	0,1609	0,1041		
		IV	0,3008	0,3508		

Outro ponto interessante a ser observado é que os modelos testados apresentaram bom desempenho, especialmente pela sua simplicidade, pois consideram somente o consumo relativo de água como variável independente, ao passo que é de conhecimento geral que a produtividade é resultado da interação entre fatores intrínsecos (genética, adaptabilidade) e extrínsecos (luz, água, solo, ocorrência de pragas, entre outros) à planta. Confirmou-se também a afirmação inicial de FRIZZONE et al. (2005), que a produtividade pode ser

expressa exclusivamente em função da água utilizada pelo cultivo, estando todas as outras variáveis inerentes à produtividade fixas em nível ótimo.

Por fim, diante das inúmeras tentativas de ajuste realizadas no presente trabalho e dos resultados obtidos com os modelos destacados na Tabela 5.17, considera-se que houve êxito na obtenção dos mesmos, uma vez que PICINI (1998) e FRIZZONE et al. (2005) consideram que os métodos utilizados para estabelecer a relação planta-clima variam desde simples correlações, modelos agrometeorológicos, até modelos complexos, ou seja, funções de produção que podem considerar diferentes parâmetros envolvidos no sistema produtivo. Caso houvesse a necessidade de ajustamento de uma função de produção para a região de Ponta Grossa, os procedimentos seriam muito mais onerosos e laboriosos.

## 5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A soja é uma cultura muito importante para o Estado do Paraná e para a região dos Campos Gerais do Paraná (Ponta Grossa). Assim, deve ser incentivada a continuidade do desenvolvimento de estudos visando o aprimoramento de modelos para estimar a produtividade da cultura.

As estimativas de produtividade obtidas no presente estudo com os modelos de STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979) e JENSEN (1968), considerando a disposição temporal das produtividades (“Ano 1” e “Ano 2”) e utilizando coeficientes e fatores ajustados apresentaram os melhores desempenhos. No entanto, em função das considerações dispostas no presente estudo e tendo em vista a afirmação de BERLATO (1987), de que a calibração de coeficientes ou fatores para cada localidade pode permitir a obtenção de estimativas mais precisas de produtividade por meio de modelos agrometeorológicos, é aconselhável que os mesmos sejam ajustados para cada localidade da região dos Campos Gerais do Paraná.

A utilização dos modelos agrometeorológicos planta-clima, considerando apenas alguns parâmetros dos estádios fenológicos da cultura da soja e a evapotranspiração relativa ( $ER/ET_c$ ) mostrou limitações para a região de Ponta Grossa-PR. Contudo, a obtenção de melhores estimativas de produtividade foi viabilizada com a consideração de outra variável, sendo que o comportamento temporal das produtividades da cultura mostrou significativa influência no processo produtivo da cultura da soja, para a região de Ponta Grossa-PR. Assim, considerando um provável ajustamento dos modelos agrometeorológicos para as localidades

da região dos Campos Gerais do Paraná, não se deve perder de vista que o desenvolvimento ou aprimoramento destes modelos deve ser simples, para permitir o seu ajustamento a partir de um pequeno número de dados, o que implica em menores custos e rapidez na obtenção dos resultados.

Outro fato importante a ser considerado refere-se à qualidade dos dados a serem utilizados. No presente trabalho, todos os cuidados quanto à coleta, tabulação e análises dos dados foram realizados, tentando da melhor maneira possível diminuir o erro experimental. No entanto, não se pode deixar de comentar que diversas dificuldades foram encontradas, tais como: (a) mudança na localidade da estação climatológica utilizada no período considerado no trabalho; (b) falta de dados climatológicos para a estimativa da *ET<sub>o</sub>*; (c) falhas existentes nas séries dos dados climáticos; (d) erros metodológicos encontrados em algumas bibliografias. Contudo, devido aos cuidados tomados, acredita-se que os pontos levantados anteriormente não prejudicaram significativamente os resultados obtidos. A intenção de ressaltar estas evidências consiste apenas em alertar aos pesquisados quanto aos problemas que podem surgir na condução de futuros trabalhos científicos envolvendo esta linha de pesquisa.

Cabe aqui ressaltar, também, a importância dos dados coletados e fornecidos pela Fundação ABC e SIMEPAR, sem os quais, o presente trabalho jamais poderia ser desenvolvido em um programa de pós-graduação. Sem maiores burocracias, o SIMEPAR forneceu gratuitamente todos os dados climáticos que dispunha da região. Assim como a Fundação ABC, que vem conduzindo criteriosamente um experimento de longa duração (mais de 11 anos) utilizando recursos próprios.

Recomenda-se à Fundação ABC o aproveitamento da área experimental implantada e dos dados experimentais já coletados para desenvolver estudos visando à avaliação das causas do comportamento temporal das produtividades apresentadas pela cultura da soja, na região de Ponta Grossa-PR. Um re-planejamento do esquema de rotação de culturas adotado no experimento, também pode ser avaliado, buscando evitar a disposição de dois anos consecutivos com a mesma cultura em campo, seja ela soja, milho, trigo, aveia, entre outras, bem como evitar o uso repetido de um mesmo cultivar por vários anos seguidos.

## 6 CONCLUSÕES

Conforme as informações obtidas e analisadas no presente trabalho, para a região de Ponta Grossa-PR, concluiu-se que:

- Os sistemas de manejo plantio direto, convencional, preparo mínimo e direto escarificado, implantados a mais de 11 anos em Latossolo Vermelho, textura argilosa, não proporcionaram diferença significativa nos valores de *CAD* levantados, nem nas produtividades reais registradas nas 11 safras estudadas;
- Os modelos simplificados (linear, potencial, exponencial, logaritmo e polinomial de segundo grau) que relacionaram produtividade e parâmetros climáticos não retornaram estimativas de produtividade satisfatórias estatisticamente, quando foram consideradas as 11 safras estudadas;
- Os sete modelos agrometeorológicos testados não retornaram estimativas de produtividade satisfatórias estatisticamente, tanto para coeficientes ou fatores obtidos na bibliografia como para os coeficientes ou fatores ajustados por regressão, quando foram consideradas as 11 safras estudadas;
- Considerando a rotação de cultura, a produtividade da cultura da soja em anos consecutivos apresenta uma diferença média positiva de 10,31% nas safras “Ano 1” em comparação com as safras “Ano 2”;
- A disposição temporal das produtividades em agrupamentos de safras “Ano 1” e “Ano 2” melhorou significativamente o estreitamento da relação linear entre produtividade real vs produtividade estimada por modelos;
- A utilização de coeficientes ou fatores obtidos na bibliografia não possibilitou a obtenção de estimativas de produtividade estatisticamente satisfatórias para safras contendo agrupamento “Ano 1” ou “Ano 2” com os modelos agrometeorológicos;
- Os modelos STEWART, HAGAN e PRUITT (1976) proposto por DOORENBOS e KASSAN (1979) e JENSEN (1968) utilizando coeficientes e fatores obtidos por regressão, proporcionaram as relações lineares mais estreitas entre as produtividades reais e estimadas, com  $R^2$  iguais a 0,7469 e 0,7387 para as safras “Ano 1”, respectivamente, e 0,8127; 0,7802 para a safra “Ano 2”, respectivamente.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBINO, U. B.; CAMPO, R. J. Efeito de fontes e doses de molibdênio na sobrevivência do *Bradyrhizobium* e na fixação biológica de nitrogênio em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p.527-534, 2001.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage paper 56**. Roma: FAO, p. 301. 1998. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.HTM>. Acessado em: 20/09/2007.

AMORIM, L. Ciclo das relações patógeno-hospedeiro: sobrevivência do inóculo. In: BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H.; AMORIM, L. (Eds.). **Manual de fitopatologia: princípios e conceitos**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1995, 3. ed. v. 1. p. 246-267.

ANUÁRIO BRASILEIRO DA SOJA: Santa Cruz do Sul: Gazeta Grupo de Comunicações, 2000. 143p.

ARRUDA, F. B.; ZULLO JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, J. B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 11, n. 1, p. 11-15, 1987.

ARYA, L. M.; PARIS, J. F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, n. 6, p.1023-1030, 1981.

AWAD, M.; CASTRO, P. R. C. **Introdução à fisiologia vegetal**. 2. ed. São Paulo: Nobel, 1992.

BERLATO, M. A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos da soja e o déficit hídrico para o estado do Rio Grande do Sul**. São José dos Campos, 1987. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação de tanque "classe A" e radiação solar global. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.22, n.2, p.251-259, 1986.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5.ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1989.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN JÚNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.1, p.155-163, 2004.



BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.58, n.3, p.555-560, 2001.

BIANCO, R. Manejo de Pragas do Milho em Plantio Direto. In: INSTITUTO BIOLÓGICO DE SÃO PAULO (Org.). **Encontro de fitossanidade de grãos**. Campinas: Emopi, 2005. p. 8-17.

BRUNINI, O.; MIRANDA, M. A. C.; MASCARENHAS, H. A.; PEREIRA, J. C. V. N. A.; SCHIMIDT, N. C. Teste de um modelo agroclimático que relacione o regime pluviométrico com as variações da produtividade agrícola. In: SEGOVIA, R. M., ed. **Determinação do efeito da precipitação pluviométrica na produtividade agrícola**. Brasília: CFP, 1982. p. 21-46.

BUHLER, D. D. Influence of tillage systems on weed population dynamics and management in corn and soybean in the central USA. **Crop Science**, Madison, v.35, p.1247-1258, 1995.

CALEGARI, A.; CASTRO FILHO, C.; TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. F. Melhoria da agregação do solo através do sistema de plantio direto. **Semina**, Londrina, v. 27, n. 2, p. 147-158, 2006.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 789-796, 2005.

CAMARGO, L. E. A. Genética da interação patógeno-hospedeiro: mecanismos de variabilidade genética de agentes fitopatogênicos. In: BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H.; AMORIM, L. (Eds.). **Manual de fitopatologia: princípios e conceitos**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1995, 3. ed. v. 1. p 455-469.

CAMARGO, L. E. A.; BERGAMIN FILHO, A. Controle e manejo: controle genético. In: BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H.; AMORIM, L. (Eds.). **Manual de fitopatologia: princípios e conceitos**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1995, 3. ed. v. 1. p 729-760.

CAMARGO, M. B. P.; BRUNINI, O.; MIRANDA, M. A. C. Modelo agrometeorológico para estimativa da produtividade para a cultura da soja no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 45, n. 2, p. 279-292, 1986.

CAMARGO, M. B. P.; ORTOLANI, A. A.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; ROSA, S. M. Modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade para o cultivar de laranja Valência. **Bragantia**, Campinas, v. 58, n. 1, p. 171-178, 1999.

CANZIANI, J. R. F.; GUIMARÃES, V. D. A.; WATANABE, M. Cadeia produtiva da soja. In: ———. **Grandes lavouras I: cd 1 - soja**. Curitiba: UFPR, 2006.

CARVALHO, L. G.; SEDIYAMA, G. C.; CECON, P. R.; RAMOS ALVES, H. M. Avaliação de um modelo agrometeorológico para previsão de produtividade de café em três localidades da região sul do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.11, n.2, p.343-352, 2003.

CASTRO, O. M.; LOMBARDI NETO, F.; VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F. Sistemas convencionais e reduzidos de preparo do solo e as perdas por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 10, n. 2, p. 167-171, 1986.

COGO, N. P.; MOLDENHAUER, W. C.; FOSTER, G. R. Soil loss reductions from conservation tillage practices. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.48, n.2, p.368-373, 1984.

CORAL, G.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; IAFFE, A. Utilização de um modelo agrometeorológico na estimativa de produtividade de cultura da soja no Estado do Paraná. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA - CBAgro 2005 (Campinas: 2005). **Anais**. Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2005.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 527-535, 2003.

COSTA, J. A. **Cultura da soja**. Porto Alegre: I. Manica, J. A. Costa, 1996.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES FILHO, A. et al.. Glossário. In: ———. **Cultivo do milho**. Brasília: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. Disponível em: <http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho/index.htm> . Acessado em: 27/02/2007.

DALLACORT, R.; FREITAS, P. S. L.; FARIA, R. T.; GONÇALVES, A. C. A.; REZENDE, R.; BERTONHA, A. Utilização do modelo Cropgro-soybean na determinação de melhores épocas de semeadura da cultura da soja, na região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 28, n. 4, p. 583-589, 2006.

DENARDIN, J. E. Preparo conservacionista do solo. **Plantio Direto**, Ponta Grossa, v.5, n.21, p.2, 1987.

DEUBER, R. **Ciência das plantas daninhas: fundamentos**. v. 1. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 431p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. **FAO Irrigation and Drainage**. Rome: FAO, paper 33, p. 197. 1979.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Crop water requeriments. **FAO Irrigation and Drainage**. Rome: FAO, v. 24, p. 179. 1975.

DROS, J. M. **Administrando os avanços da soja: dois cenários de expansão do cultivo de soja na América do Sul**. Amsterdã: AIDEnvironment, 2004. 71p.

ELTZ, F. L. F.; CASSOL, E. A.; SCOPEL, I.; GUERRA, M. Perdas de solo e água por erosão em diferentes sistemas de manejo e coberturas vegetais em solo Laterítico Bruno-Avermelhado distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, n. 1, p. 117-125, 1984.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa CNPS, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Programa SOC - Software Científico**, Versão 2.1, Embrapa Informática Agropecuária, 1990.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Soja: história**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. Acessado em: 20/06/2007. Disponível em: [http://www.cnpso.embrapa.br/index.php?op\\_page=112&cod\\_pai=33](http://www.cnpso.embrapa.br/index.php?op_page=112&cod_pai=33).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Tecnologias de produção de soja - Paraná - 2007**. Londrina: Embrapa Soja, 2006. Disponível em: [http://www.cnpso.embrapa.br/download/tpsoja\\_2007\\_pr.pdf](http://www.cnpso.embrapa.br/download/tpsoja_2007_pr.pdf) . Acessado em: 16/02/2007.

FARIAS, J. R. B. Climatic requeriments. In: EMBRAPA SOJA. **Tropical soybean: improviment and production**. Rome: FAO, 1994. p. 13-17. (FAO Plant Production and Protection Series, 27).

FARIAS, J. R. B.; ASSAD, E. D.; ALMEIDA, I. R.; EVANGELISTA, B. A.; LAZZAROTTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.. Caracterização do risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.

FAVARETTO, N. F.; COGO, N. P.; BERTOL, O. J. Uso, manejo e conservação do solo e água: aspectos agrícolas e ambientais. In: LIMA, M. R. (Ed.); SIRTOLI, A. E.; MOTTA, A. C. V. et al. **Diagnóstico e recomendação de manejo do solo: aspectos teóricos e metodológicos**. Curitiba: UFPR/Setor de Ciências Agrárias, 2006. p. 293-341.

FERREIRA, P. V. **Estatística experimental aplicada à agronomia**. Maceió: EDUFAL, 1991. 437p.

FIETZ, C. R.; URCHER, M. A. Deficiência hídrica da cultura da soja na região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 262-265, 2002.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas: o estudo que está por trás do que se vê**. 2. ed. Passo Fundo: UFP, 2004. 536 p.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; LAUSCHNER, M. H.; MELLO, R. W. Modelo de estimativa de rendimento da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 399-403, 2001.

FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, J. L. M.; ZOCOLER, J. L. Funções de produção água-cultura. In: ———. **Planejamento de irrigação: análise e decisão de investimento**. Brasília: Embrapa, 2005. p. 283-314.

FUNDAÇÃO CARGILL. **A soja no Brasil Central**. 2. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1982. 444p.

GENRO JÚNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 477-484, 2004.

GOMES, S. **Ajuste e avaliação de um modelo de balanço hídrico decendial e estudo dos limites de sua utilização em algumas localidades no Estado do Paraná**. Curitiba, 2005.

Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

HOWELL, T. A.; CUENCA, R. H.; SOLOMON, K. H. Crop yield response. In: HOFFMAN, G. J.; HOWELL, T. A.; SOLOMON, K. H. (ed.). **Management of farm irrigation of agricultural systems**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1992. p. 93-122.

HOWELL, T. A.; HILER, E. A. Optimization of water use efficiency under high frequency irrigation – I. **Transactions of the ASAE**, v. 18, p. 873-878, 1975.

JENSEN, M. E. Water consumption by agricultural plants. In: KOZLOWSKY, T. T. (ed.). **Water deficits and plant growth**, New York: Academic Press, p. 1-22, 1968.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de aplicação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, n. 3, p. 395-401, 1995.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1979. 264p.

LLANILLO, R. F.; RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M. F.; FERREIRA, R. R. M. Evolução de propriedades físicas do solo em função dos sistemas de manejo em culturas anuais. **Semina**, Londrina, v. 27, n. 2, p. 205-220, 2006.

MARION, E. **Parâmetros hídricos para estimativa do rendimento de grãos de soja**. Florianópolis, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina.

MARTINS, A. N.; ORTOLANI, A. A. Estimativa de produção de laranja valência pela adaptação de um modelo agrometeorológico. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 2, p. 355-361, 2006.

MATZENAUER, R. **Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho em função da disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1994. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia, Universidade de Federal do Rio Grande do Sul.

MINHAS, B. S.; PARIKH, K. S.; SRINIVASAN, T. N. Towards the structure of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water. **Water Resource Research**, v. 10, p. 383-393, 1974.

MELLO, F. A. F.; BRASIL SOBRINHO, M. O. C.; ARZOLLA, S.; SILVEIRA, R. I.; COBRA NETTO, A.; KIEHL, J. C. K. **Fertilidade do solo**. São Paulo: Nobel, 1983. 400p.

MORAES, A. V. C.; CAMARGO, M. B. P.; MASCARENHAS, H. A. A.; MIRANDA, M. A. C.; PEREIRA, J. C. V. N. A. Teste e análise de modelos agrometeorológicos de estimativa de produtividade para a cultura da soja na região de Ribeirão Preto. **Bragantia**, Campinas, v. 57, n. 2, p. 393-406, 1998.

MUNDSTOCK, C. M.; THOMAS, A. L. **Soja: fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Porto Alegre: Departamento de Plantas de Lavoura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

PAULA JÚNIOR, T. J.; VENZON, M. (Coords.). **101 culturas: manual de tecnologias agrícolas**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2007. 800p.

PAULETTI, V.; LIMA, M. R.; BARCIK, C.; BITTENCOURT, A. Rendimento de grãos de milho e soja em uma sucessão cultural de oito anos sob diferentes sistemas de manejo de solo e de culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 3, p. 491-495, 2003.

PEREIRA, A. R.; VILA NOVA, N. A.; SEDYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: ESALQ, 1997.

PICINI, A. G. **Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) a partir do monitoramento da disponibilidade hídrica do solo**. Piracicaba, 1998. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Agrometeorologia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

POPINIGIS, F. **Fisiologia da semente**. 2 ed, Brasília: Abrates, 1985. 286p.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Salesward-Discovery, 1996. 446 p.

PREVEDELLO, C. L. **Programa *SPLINTEX* para estimar a curva de retenção de água a partir da granulometria (composição) do solo – Versão 1.0**. 1999.

RAO, N. H.; SARMA, P. B. S.; CHANDER, S. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 13, p. 25-32, 1988.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; McCOOL, D. K.; YODER, D. C. **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. Washington: United States Department of Agriculture (USDA), 1997. 404 p. (Agricultural Handbook, 703).

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

SANTOS, M. A.; CAMARGO, M. B. P. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro nas condições do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.65, n.1, p.173-183, 2006.

SCHUSTER, I. **Soja e saúde**. Cascavel: Coodetec, 2007. Disponível em: <http://www.coodetec.com.br/sojasaude/> . Acessado em: 03/07/2007.

SECRETARIA DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO DO PARANÁ (SEAB). **Comparativo da área e da produção de produtos selecionados, no Paraná - safras 2005/06 a 2007/08**. Curitiba: SEAB/DERAL, 2008a. Tabela. Disponível em: <http://www.pr.gov.br/seab/deral/pss.xls> . Acessado em: 02/04/2008.

SECRETARIA DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO DO PARANÁ (SEAB). **Soja normal - Núcleo Regional de Ponta Grossa-PR - comparativo de área, produção e produtividade - 06/07 - 07/08**. Curitiba: SEAB/DERAL, 2008b. Tabela.

SEIXAS, J.; ROLOFF, G.; RALISCH, R. Tráfego de máquinas e enraizamento do milho em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 4, p. 794-798, 2005.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 12, p. 2485-2492, 2000.

SILVA, C. C.; SILVEIRA, P. M. Influência de sistemas agrícolas em características químico-físicas do solo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 26, n. 3, p. 505-515, 2002.

SOUZA, J. C. **Ocorrência da broca da cana-de-açúcar em lavouras de milho sob pivô central no sul de Minas**. Lavras: Centro Tecnológico do Sul de Minas - CTSM, 2005a. 3 p. (Circular Técnica, 183).

SOUZA, J. L. M. **Modelo para a análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para cultura do cafeeiro**. Piracicaba, 2001. Tese (Doutorado em Agronomia, área de concentração Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

SOUZA, J. L. M. **Programa MORETTI – Módulo: Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista**. Versão 2.0, 2005b. Disponível em: <http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/>. Acessado em: 04/03/2007.

SOUZA, J. L. M. **Programa MORETTI - Módulo balanço hídrico sequencial** (periodicidade: 1, 5, 7, 10, 15 e 30 dias), Versão 1.0, 2008. Disponível em: <http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/>. Acessado em: 15/01/2008.

SOUZA, J. L. M.; GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 2, p. 153-163, 2008.

STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H. **Principles and procedures of statistics**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1980. 633 p.

STEWART, J. I.; HAGAN, R. M.; PRUITT, W. O. **Production functions and predicted irrigation programmes for a principal crops as required for water resources planning and increased water efficiency**: final report. Washington: U.S. Department of Interior, 1976. p. 80.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Simulação do impacto da mudança climática sobre a água disponível do solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 424-433, 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Tradução de: Elaine Romanato Santarém ... [et al.], Porto Alegre: Artmed, 3. ed., 2004. 719p.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Publications in Climatology**, New Jersey, v. 1, n. 8, p. 1-104, 1955.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2 ed, Porto Alegre: UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) - Editora da Universidade, 1997.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VAUX, H. J.; PRUITT, W. Crop-water production funciones. In: HILLEL, D. (ed.). **Advances in irrigation**. New York: Academic Press, v. 2, p. 61-97, 1983.

VEIGA, M.; AMADO, T. J. Preparo do solo. In: SANTA CATARINA. Secretaria de Estado da Agricultura e Abastecimento. **Manual de uso, manejo e conservação do solo e da água: projeto de recuperação, conservação e manejo dos recursos naturais em microbacias hidrográficas**. 2ed. Florianópolis: EPAGRI, 1994. p. 165-202.

VEIHMEYER, V. J.; HENDRICKSON, A. H. Methods of measuring field capacity and wilting percentage of soils. **Soil Science Society**, Baltimore, v.68, p. 75-94. 1949.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K. M.; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington D.C., v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

## ANEXO A

### DEMONSTRAÇÃO DA INVERSÃO DA EQUAÇÃO DE TÉTENS OBJETIVANDO ISOLAR A TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO ( $T_{dew}$ ).

A FAO (ALLEN et al., 1998) apresenta diversas relações para a obtenção da pressão atual de vapor ( $e_a$ ). Estas relações incluem desde a utilização de valores diários de umidade relativa do ar máxima ( $UR_{max}$ ), média ( $UR_{med}$ ) ou mínima ( $UR_{min}$ ), até valores temperatura do bulbo seco ( $T_{dry}$ ) e úmido ( $T_{wet}$ ). Contudo, ao relacionar a  $e_a$  com a temperatura do ponto de orvalho ( $T_{dew}$ ), como apresentado abaixo, é possível realizar o caminho inverso, obtendo-se  $T_{dew}$  a partir de valores de  $e_a$ .

$$e^o(T_{dew}) = e_a = 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_{dew}}{T_{dew} + 237,3}\right)$$

Sendo:  $e^o(T_{dew})$  – pressão de saturação do vapor com base na temperatura do ponto de orvalho diária do ar (kPa);  $e_a$  – pressão atual do vapor (kPa);  $\exp(\dots)$  – base do logaritmo neperiano (2,7183) elevada a potência (...);  $T_{dew}$  – temperatura do ponto de orvalho do ar (°C).

Como a equação iguala  $e^o(T_{dew})$  a  $e_a$ , tem-se:

$$\frac{e_a}{0,6108} = \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_{dew}}{T_{dew} + 237,3}\right)$$

Utiliza-se logaritmo natural para remover o exponencial da equação:

$$\ln \frac{e_a}{0,6108} = \ln \left[ \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_{dew}}{T_{dew} + 237,3}\right) \right]$$

Como se trata de uma divisão, aplica-se a propriedade logarítmica:

$$\ln e_a - \ln 0,6108 = \frac{17,27 \cdot T_{dew}}{T_{dew} + 237,3}$$

Obtém-se o  $\ln$  de 0,6108:

$$\ln e_a + 0,493 = \frac{17,27 \cdot T_{dew}}{T_{dew} + 237,3}$$



O denominador da fração passa para o outro lado da igualdade multiplicando:

$$(T_{dew} + 237,3) \cdot (\ln e_a + 0,493) = 17,27 \cdot T_{dew}$$

Aplica-se a propriedade distributiva:

$$T_{dew} \cdot \ln e_a + 0,493 \cdot T_{dew} + 237,3 \cdot \ln e_a + 116,9889 = 17,27 \cdot T_{dew}$$

Todas as variáveis  $T_{dew}$  são transferidas para um dos lados da igualdade:

$$T_{dew} \cdot \ln e_a + 0,493 \cdot T_{dew} - 17,27 \cdot T_{dew} = -237,3 \cdot \ln e_a - 116,9889$$

Após a subtração dos valores de  $T_{dew}$ , isola-o como multiplicador comum:

$$T_{dew} \cdot (16,777 - \ln e_a) = 237,3 \cdot \ln e_a + 116,9889$$

Por fim, os valores que multiplicam  $T_{dew}$  são transferidos para o outro lado da igualdade, na forma de divisão, obtendo-se a equação final apresentada:

$$T_{dew} = \frac{237,3 \cdot \ln e_a + 116,9889}{16,777 - \ln e_a}$$

## ANEXO B

### PROCEDIMENTOS DE AMOSTRAGEM E ANÁLISE LABORATORIAL PARA OBTENÇÃO DO PONTO DA CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO ( $\theta_{su}$ ) E MASSA ESPECÍFICA DO SOLO ( $\rho_s$ )

A amostragem do solo para determinação da massa específica e do ponto da curva de retenção da água no solo foi realizada pelo método do anel volumétrico. Introduziu-se no solo um anel de aço (Kopecky) de bordas cortantes e volume interno de 50 cm<sup>3</sup> à profundidade de 15 cm, em seguida retirou-se o solo de seu entorno e, com o auxílio de uma pá, o anel foi removido com o cuidado de manter o solo de seu interior sem maiores deformações. Por fim, a amostra foi identificada e envolvida em papel filme para acondicionamento, sendo encaminhada ao Laboratório de Física do Solo, para posteriores análises, as quais seguiram as metodologias descritas por EMBRAPA (1997).

No laboratório, procedeu-se a análise para aferir ponto da curva de retenção da água no solo pela metodologia da mesa de tensão. Envolveu-se a base de cada anel com tecido poroso (voal), prendendo-o com auxílio de um elástico. Então os anéis foram colocados com a base envolta para baixo no interior de um recipiente (45 cm x 30 cm x 8 cm) contendo água deionizada, em volume suficiente para cobrir a metade da altura destes, a fim de saturar as amostras. O tecido permitiu a livre passagem da água ao mesmo tempo em que conteve eventuais perdas de solo. Após um período de 24 horas, as amostras foram colocadas no interior da mesa de tensão, sob uma pressão de 0,60 m de coluna de água, equivalente a 6 kPa, onde permaneceram por mais 24 horas.

Após a retirada dos anéis, com seus respectivos tecidos e elásticos, da mesa de tensão, eles foram pesados separadamente para obtenção do peso úmido, foram colocados em estufa a 105 °C até peso constante, o que ocorreu após 24 horas. Pesou-se o conjunto (anel + solo) e, em seguida, foram determinados o volume e o peso de cada anel que continha as amostras. Finalmente, obteve-se o ponto da curva de retenção da água no solo e a massa específica do solo por meio das seguintes equações:

$$(a) \quad \theta_{su} = \frac{(m_{su} - m_{ss})}{V_{i.a.}} \cdot 100$$

$$(b) \quad \rho_s = \frac{m_{ss}}{V_{i.a.}}$$

Sendo: (a)  $\theta_{su}$  – umidade do solo com base em volume (%);  $m_{su}$  – massa da amostra úmida (g);  $m_{ss}$  – massa da amostra seca a 105 °C (g);  $V_{i.a.}$  – volume interno do anel volumétrico (cm<sup>3</sup>); (b)  $\rho_s$  – massa específica da amostra de solo (g·cm<sup>-3</sup>);  $m_{ss}$  – massa da amostra seca a 105 °C (g);  $V_{i.a.}$  – volume interno do anel volumétrico (cm<sup>3</sup>).

## ANEXO C

### PROCEDIMENTOS DE AMOSTRAGEM E ANÁLISE LABORATORIAL PARA OBTENÇÃO DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DO SOLO

Para realização da análise granulométrica do solo, a amostragem foi realizada com o auxílio de um trado holandês. Retirou-se uma amostra de solo referente à profundidade de zero a 15 cm em cada repetição. Logo após, a amostra foi acondicionada do interior de um saco plástico e identificada, sendo então encaminhada ao Laboratório de Física do Solo, para posterior análise, a qual seguiu a metodologia descrita por EMBRAPA (1997).

A análise granulométrica foi realizada por meio do método do densímetro, sendo as determinações feitas por meio da densimetria das suspensões de solo selecionadas a diferentes tempos, de acordo com os mesmos princípios da lei de Stokes.

Para tanto, colocou-se o conteúdo de solo amostrado (amostra deformada) no interior de recipientes de metal, encaminhando-o para secagem em estufa a 105 °C por um período de 24 horas, a fim de eliminar toda a água presente no material. Após a secagem, o solo foi submetido a peneiramento em peneira com abertura de 2 mm, a qual permite a passagem das frações areia ( $2 - >0,053$  mm), silte ( $0,053 - 0,002$  mm) e argila ( $<0,002$  mm).

Em seguida pesou-se 20 g de solo, colocando-o no interior de um Erlenmeyer de 400 ml de capacidade aferida total, tendo este procedimento sido realizado três vezes, para cada amostra, que constitui três repetições, perfazendo um total de 36 triplicatas. Em cada Erlenmeyer foi adicionado 25 ml de solução de NaOH 1 N, completou-se o volume com água deionizada até 150 ml, tampou-se os recipientes, deixando-os em agitação vigorosa por 12 horas.

A solução de NaOH 1 N adicionada tem por finalidade promover a dispersão das partículas individuais dos agregados do solo (areia, silte e argila), viabilizando, assim, a aferição de suas quantidades. Para seu preparo, pesou-se em um Becker 80 g de NaOH em pérolas e com o auxílio de um funil e um jato de água deionizada, transferiu-se o NaOH para um balão volumétrico de 2 L de capacidade aferida total. Completou-se aos poucos o volume com água deionizada, devido ao hidróxido de sódio apresentar reação exotérmica muito forte com a água. Por fim, a solução foi agitada periodicamente para homogeneização.

Sobre um suporte de metal foi apoiado um funil de vidro, dentro deste foi colocada uma peneira com abertura de 0,053 mm. Decorrido o período de agitação, as triplicatas foram

despejadas no interior da peneira. Desta forma, a porção “água + silte + argila” foi armazenada em uma proveta de 1000 ml já posicionada abaixo do funil. Foram aplicados jatos de água deionizada sobre o material que permaneceu sobre a malha da peneira, visando separar o máximo possível a fração areia das demais.

Completo-se o volume, quando necessário, das provetas de 1000 ml com água deionizada. Logo depois, o material foi agitado por um minuto e meio, com o auxílio de um agitador motorizado e, em seguida, deixou-se o material em repouso por 1 hora e meia.

Com o auxílio de um pisset, transferiu-se o material que estavam sobre a malha da peneira para um grau de porcelana e neste separou-se a areia das impurezas por diferença de densidade. Por fim, transferiu-se a areia presente no interior do grau para uma placa de petri, a qual foi encaminhada para secagem em estufa a 105 °C por um período de 12 horas, com posterior pesagem para constituir a fração areia.

Após o período de repouso, o material no interior da proveta de 1000 ml foi sifonado para uma proveta de 250 ml, com o auxílio de um compressor. Em seguida, foi adicionada uma gota de álcool amílico ( $C_5H_{11}OH$ ) por proveta para evitar formação de bolhas na superfície da água e, com isso, facilitar a leitura da fração argila, a qual foi realizada com um densímetro. A fração silte foi obtida por diferença.

## ANEXO D

### DETALHAMENTO DO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS, EMPREGADO PARA A OBTENÇÃO DOS COEFICIENTES $ky_i$ E $\lambda$

Os passos a seguir descrevem detalhadamente a resolução do método dos mínimos quadrados para o coeficiente  $ky_i$ . Os procedimentos são iguais para o coeficiente  $\lambda$ , podendo ser substituído no lugar de  $ky_i$ , tendo em vista as considerações referentes a  $Yt_j$  e  $Xt_j$ , em que:

– Para  $ky_i$  têm-se:

$$Yt_j = 1 - \left( \frac{Yr_j}{Yp} \right)$$

$$Xt_{Ij} = \left( 1 - \frac{ER_I}{ETc_I} \right)_j \quad Xt_{IIj} = \left( 1 - \frac{ER_{II}}{ETc_{II}} \right)_j \quad Xt_{IIIj} = \left( 1 - \frac{ER_{III}}{ETc_{III}} \right)_j \quad Xt_{IVj} = \left( 1 - \frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}} \right)_j$$

– Para  $\lambda$ , na equação de JENSEN (1968), têm-se:

$$Yt_j = \ln \left( \frac{Yr_j}{Yp} \right)$$

$$Xt_{Ij} = \ln \left( \frac{ER_I}{ETc_I} \right)_j \quad Xt_{IIj} = \ln \left( \frac{ER_{II}}{ETc_{II}} \right)_j \quad Xt_{IIIj} = \ln \left( \frac{ER_{III}}{ETc_{III}} \right)_j \quad Xt_{IVj} = \ln \left( \frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}} \right)_j$$

– Para  $\lambda$ , na equação de MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974), têm-se:

$$Yt_j = \ln \left( \frac{Yr_j}{Yp} \right)$$

$$Xt_{Ij} = \ln \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_I}{ETc_I} \right)^2 \right]_j \quad Xt_{IIj} = \ln \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_{II}}{ETc_{II}} \right)^2 \right]_j$$

$$Xt_{IIIj} = \ln \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_{III}}{ETc_{III}} \right)^2 \right]_j \quad Xt_{IVj} = \ln \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}} \right)^2 \right]_j$$

Assumindo-se as devidas representações, a função passa a ser expressa por:

$$\hat{Y}t = ky_0 + ky_I \cdot Xt_I + ky_{II} \cdot Xt_{II} + ky_{III} \cdot Xt_{III} + ky_{IV} \cdot Xt_{IV}$$

Pelo método dos mínimos quadrados, tem-se:

$$Z = \sum_{j=1}^n (Yt_j - \hat{Y}t_j)^2$$

Substituindo  $\hat{Y}t$  na função Z, tem-se:

$$Z = \sum_{j=1}^n \left[ Yt_j - ky_0 - (ky_I \cdot Xt_{Ij}) - (ky_{II} \cdot Xt_{IIj}) - (ky_{III} \cdot Xt_{IIIj}) - (ky_{IV} \cdot Xt_{IVj}) \right]^2$$

Aplicando-se a derivada parcial da equação em função dos coeficientes  $ky_0$ ,  $ky_I$ ,  $ky_{II}$ ,  $ky_{III}$ ,  $ky_{IV}$ , tem-se:

$$\frac{\partial Z}{\partial ky_0} = 2 \cdot \sum_{j=1}^n \left[ Yt_j - ky_0 - (ky_I \cdot Xt_{Ij}) - (ky_{II} \cdot Xt_{IIj}) - (ky_{III} \cdot Xt_{IIIj}) - (ky_{IV} \cdot Xt_{IVj}) \right] \cdot (-1) = 0$$

$$\frac{\partial Z}{\partial ky_I} = 2 \cdot \sum_{j=1}^n \left[ Yt_j - ky_0 - (ky_I \cdot Xt_{Ij}) - (ky_{II} \cdot Xt_{IIj}) - (ky_{III} \cdot Xt_{IIIj}) - (ky_{IV} \cdot Xt_{IVj}) \right] \cdot (-Xt_{Ij}) = 0$$

$$\frac{\partial Z}{\partial ky_{II}} = 2 \cdot \sum_{j=1}^n \left[ Yt_j - ky_0 - (ky_I \cdot Xt_{Ij}) - (ky_{II} \cdot Xt_{IIj}) - (ky_{III} \cdot Xt_{IIIj}) - (ky_{IV} \cdot Xt_{IVj}) \right] \cdot (-Xt_{IIj}) = 0$$

$$\frac{\partial Z}{\partial ky_{III}} = 2 \cdot \sum_{j=1}^n \left[ Yt_j - ky_0 - (ky_I \cdot Xt_{Ij}) - (ky_{II} \cdot Xt_{IIj}) - (ky_{III} \cdot Xt_{IIIj}) - (ky_{IV} \cdot Xt_{IVj}) \right] \cdot (-Xt_{IIIj}) = 0$$

$$\frac{\partial Z}{\partial ky_{IV}} = 2 \cdot \sum_{j=1}^n \left[ Yt_j - ky_0 - (ky_I \cdot Xt_{Ij}) - (ky_{II} \cdot Xt_{IIj}) - (ky_{III} \cdot Xt_{IIIj}) - (ky_{IV} \cdot Xt_{IVj}) \right] \cdot (-Xt_{IVj}) = 0$$

Rearranjando as equações, têm-se:

$$ky_0 \cdot n + ky_I \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij}) + ky_{II} \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj}) + ky_{III} \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{IIIj}) + ky_{IV} \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{IVj}) = \sum_{j=1}^n Yt_j$$

$$ky_0 \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij}) + ky_I \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij})^2 + ky_{II} \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Xt_{IIj}) + ky_{III} \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Xt_{IIIj}) + ky_{IV} \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Xt_{IVj}) = \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Yt_j)$$

$$ky_0 \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj}) + ky_I \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Xt_{IIj}) + ky_{II} \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj})^2 + ky_{III} \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj} \cdot Xt_{IIIj}) + ky_{IV} \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj} \cdot Xt_{IVj}) = \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj} \cdot Yt_j)$$

$$ky_0 \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{IIIj}) + ky_I \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Xt_{IIIj}) + ky_{II} \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj} \cdot Xt_{IIIj}) + ky_{III} \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{IIIj})^2 + ky_{IV} \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{IIIj} \cdot Xt_{IVj}) = \sum_{j=1}^n (Xt_{IIIj} \cdot Yt_j)$$

$$ky_0 \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{IVj}) + ky_I \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Xt_{IVj}) + ky_{II} \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj} \cdot Xt_{IVj}) + ky_{III} \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{IIIj} \cdot Xt_{IVj}) + ky_{IV} \cdot \sum_{j=1}^n (Xt_{IVj})^2 = \sum_{j=1}^n (Xt_{IVj} \cdot Yt_j)$$

Por fim, convertendo à forma matricial, é obtido um sistema de equações do tipo  $[A] \cdot [x] = [b]$ , sendo:

$$[A] = \begin{bmatrix} n & \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{IIIj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{IVj}) \\ \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij})^2 & \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Xt_{IIj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Xt_{IIIj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Xt_{IVj}) \\ \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Xt_{IIj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj})^2 & \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj} \cdot Xt_{IIIj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj} \cdot Xt_{IVj}) \\ \sum_{j=1}^n (Xt_{IIIj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Xt_{IIIj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj} \cdot Xt_{IIIj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{IIIj})^2 & \sum_{j=1}^n (Xt_{IIIj} \cdot Xt_{IVj}) \\ \sum_{j=1}^n (Xt_{IVj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Xt_{IVj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj} \cdot Xt_{IVj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{IIIj} \cdot Xt_{IVj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{IVj})^2 \end{bmatrix}$$

$$[x] = \begin{bmatrix} ky_0 \\ ky_1 \\ ky_{II} \\ ky_{III} \\ ky_{IV} \end{bmatrix}$$

$$[b] = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n (Yt_j) \\ \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Yt_j) \\ \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj} \cdot Yt_j) \\ \sum_{j=1}^n (Xt_{IIIj} \cdot Yt_j) \\ \sum_{j=1}^n (Xt_{IVj} \cdot Yt_j) \end{bmatrix}$$

Este sistema de equações foi solucionado por meio do Método da Eliminação de Gauss, o qual é descrito detalhadamente no Anexo E.



## ANEXO E

### DETALHAMENTO DO MÉTODO DA ELIMINAÇÃO DE GAUSS, EMPREGADO PARA A OBTENÇÃO DOS COEFICIENTES $ky_i$ E $\lambda$

Os passos a seguir descrevem detalhadamente a resolução do Método da Eliminação de Gauss para o coeficiente  $ky_i$ . Os procedimentos são iguais para o coeficiente  $\lambda$ , podendo ser substituído no lugar de  $ky_i$ , tendo em vista as considerações referentes à  $Yt_j$  e  $Xt_j$ , em que:

– Para  $ky_i$  têm-se:

$$Yt_j = 1 - \left( \frac{Yr_j}{Yp} \right)$$

$$Xt_{Ij} = \left( 1 - \frac{ER_I}{ETc_I} \right)_j \quad Xt_{IIj} = \left( 1 - \frac{ER_{II}}{ETc_{II}} \right)_j \quad Xt_{IIIj} = \left( 1 - \frac{ER_{III}}{ETc_{III}} \right)_j \quad Xt_{IVj} = \left( 1 - \frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}} \right)_j$$

– Para  $\lambda$ , na equação de JENSEN (1968), têm-se:

$$Yt_j = \ln \left( \frac{Yr_j}{Yp} \right)$$

$$Xt_{Ij} = \ln \left( \frac{ER_I}{ETc_I} \right)_j \quad Xt_{IIj} = \ln \left( \frac{ER_{II}}{ETc_{II}} \right)_j \quad Xt_{IIIj} = \ln \left( \frac{ER_{III}}{ETc_{III}} \right)_j \quad Xt_{IVj} = \ln \left( \frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}} \right)_j$$

– Para  $\lambda$ , na equação de MINHAS, PARIKH e SRINIVASAN (1974), têm-se:

$$Yt_j = \ln \left( \frac{Yr_j}{Yp} \right)$$

$$Xt_{Ij} = \ln \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_I}{ETc_I} \right)^2 \right]_j$$

$$Xt_{IIj} = \ln \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_{II}}{ETc_{II}} \right)^2 \right]_j$$

$$Xt_{IIIj} = \ln \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_{III}}{ETc_{III}} \right)^2 \right]_j$$

$$Xt_{IVj} = \ln \left[ 1 - \left( 1 - \frac{ER_{IV}}{ETc_{IV}} \right)^2 \right]_j$$

Considerando o sistema de equações representado matricialmente por  $[A] \cdot [x] = [b]$ , empregou-se o Método da Eliminação de Gauss a fim de transformar a matriz de “A” num sistema triangular equivalente, por meio da aplicação repetida de dois tipos de operações:

permuta entre duas linhas, visando inverter o sinal do determinante da matriz de coeficientes; e subtração de uma linha por outra multiplicada por uma constante, buscando manter inalterado o determinante desta mesma matriz. Desta forma, os sistemas obtidos foram equivalentes aos originais. Em outras palavras, o método consiste basicamente em zerar os valores presentes abaixo da linha base de cada coluna da matriz, para ao final ser possível a obtenção dos valores dos coeficientes por recorrência.

Como  $ky_0$  não existe (possui valor zero), a derivada parcial  $\frac{\partial Z}{\partial ky_0}$  também é igual a zero, pois:

$$\frac{\partial Z}{\partial ky_0} = 2 \cdot \sum_{j=1}^n [Yt_j - ky_{0j} - (ky_{Ij} \cdot Xt_{Ij}) - (ky_{IIj} \cdot Xt_{IIj}) - (ky_{IIIj} \cdot Xt_{IIIj}) - (ky_{IVj} \cdot Xt_{IVj})] \cdot 0 = 0$$

Visto que os componentes e resultado da derivada parcial  $\frac{\partial Z}{\partial ky_0}$  correspondem a primeira linha da matriz [A] e [b], respectivamente, eles passam a ser representados por zeros. Como  $ky_0$  é termo da primeira linha da matriz [x], ele é o multiplicador da primeira coluna da matriz [A], então, a primeira coluna da matriz [A] também será igualada a zero. Desta maneira, a matriz [A] passa a ser representada por [A'] e a matriz [b] por [b'], conforme segue:

$$[A'] = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij})^2 & \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Xt_{IIj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Xt_{IIIj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Xt_{IVj}) \\ \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Xt_{IIj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj})^2 & \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj} \cdot Xt_{IIIj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj} \cdot Xt_{IVj}) \\ \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Xt_{IIIj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj} \cdot Xt_{IIIj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{IIIj})^2 & \sum_{j=1}^n (Xt_{IIIj} \cdot Xt_{IVj}) \\ \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Xt_{IVj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj} \cdot Xt_{IVj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{IIIj} \cdot Xt_{IVj}) & \sum_{j=1}^n (Xt_{IVj})^2 \end{bmatrix}$$

$$[b'] = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n (Xt_{Ij} \cdot Yt_j) \\ \sum_{j=1}^n (Xt_{IIj} \cdot Yt_j) \\ \sum_{j=1}^n (Xt_{IIIj} \cdot Yt_j) \\ \sum_{j=1}^n (Xt_{IVj} \cdot Yt_j) \end{bmatrix}$$

$$[x] = \begin{bmatrix} ky_0 \\ ky_I \\ ky_{II} \\ ky_{III} \\ ky_{IV} \end{bmatrix}$$

O passo seguinte do Método da Eliminação de Gauss consistiu em inserir a matriz  $[b']$  como última coluna da matriz  $[A']$ , dando origem a matriz  $[A' + b']$ , como segue:

$$[A' + b'] = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n (X_{t_{I_j}})^2 & \sum_{j=1}^n (X_{t_{I_j}} \cdot X_{t_{II_j}}) & \sum_{j=1}^n (X_{t_{I_j}} \cdot X_{t_{III_j}}) & \sum_{j=1}^n (X_{t_{I_j}} \cdot X_{t_{IV_j}}) & \sum_{j=1}^n (X_{t_{I_j}} \cdot Y_{t_j}) \\ \sum_{j=1}^n (X_{t_{I_j}} \cdot X_{t_{II_j}}) & \sum_{j=1}^n (X_{t_{II_j}})^2 & \sum_{j=1}^n (X_{t_{II_j}} \cdot X_{t_{III_j}}) & \sum_{j=1}^n (X_{t_{II_j}} \cdot X_{t_{IV_j}}) & \sum_{j=1}^n (X_{t_{II_j}} \cdot Y_{t_j}) \\ \sum_{j=1}^n (X_{t_{I_j}} \cdot X_{t_{III_j}}) & \sum_{j=1}^n (X_{t_{II_j}} \cdot X_{t_{III_j}}) & \sum_{j=1}^n (X_{t_{III_j}})^2 & \sum_{j=1}^n (X_{t_{III_j}} \cdot X_{t_{IV_j}}) & \sum_{j=1}^n (X_{t_{III_j}} \cdot Y_{t_j}) \\ \sum_{j=1}^n (X_{t_{I_j}} \cdot X_{t_{IV_j}}) & \sum_{j=1}^n (X_{t_{II_j}} \cdot X_{t_{IV_j}}) & \sum_{j=1}^n (X_{t_{III_j}} \cdot X_{t_{IV_j}}) & \sum_{j=1}^n (X_{t_{IV_j}})^2 & \sum_{j=1}^n (X_{t_{IV_j}} \cdot Y_{t_j}) \end{bmatrix}$$

Para facilitar o entendimento e os cálculos é aconselhável nomear as linhas da matriz. Em seguida deve-se definir a linha base da coluna que se deseja zerar, sendo que: **(a)** as colunas sempre são zeradas da esquerda para a direita; **(b)** as linhas base devem ser posicionadas consecutivamente de cima para baixo; **(c)** a linha base de cada coluna será aquela que apresentar o maior valor dentro da coluna; **(d)** caso a linha com o maior valor não seja consecutiva a anterior, devo realizar a permuta entre linhas, deixando a linha com o maior valor na posição correta; **(e)** uma linha que já tenha sido base não deve mais sofrer quaisquer alterações.

Definida a linha base da coluna, deve-se aplicar a seguinte equação em cada linha abaixo da linha base:

$$L'_{kp} = L_{kp} - \left[ L_{base\ p} \cdot \left( \frac{L_{k\ fixo}}{L_{base\ fixo}} \right) \right]$$

Sendo:  $L'_{kp}$  – valor calculado para a  $k$ -ésima linha abaixo da linha base que varia conforme a  $p$ -ésima coluna (adimensional);  $L_{kp}$  – valor presente na  $k$ -ésima linha abaixo da linha base que varia conforme a  $p$ -ésima coluna (adimensional);  $L_{base\ p}$  – valor presente na  $p$ -ésima coluna da linha base (adimensional);  $L_{k\ fixo}$  – valor presente na  $k$ -ésima linha abaixo da linha base e fixo na coluna que desejo zerar (adimensional);  $L_{base\ fixo}$  – valor presente linha base e fixo na coluna que desejo zerar (adimensional).

A cada coluna zerada, deve-se repetir a matriz com os novos valores calculados e, obedecendo as regras já dispostas, definir a linha base da próxima coluna que se deseja zerar. Ao decorrer desta sequência de operações, a matriz  $[A' + b']$  vai sofrendo alterações, conforme segue:

$$\text{Matriz origem} \rightarrow [A'+b'] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & b_3 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & b_4 \end{bmatrix}$$

$$\text{Zerando a primeira coluna} \rightarrow [A'+b'] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ 0 & a'_{22} & a'_{23} & a'_{24} & b'_2 \\ 0 & a'_{32} & a'_{33} & a'_{34} & b'_3 \\ 0 & a'_{42} & a'_{43} & a'_{44} & b'_4 \end{bmatrix}$$

$$\text{Zerando a segunda coluna} \rightarrow [A'+b'] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ 0 & a'_{22} & a'_{23} & a'_{24} & b'_2 \\ 0 & 0 & a''_{33} & a''_{34} & b''_3 \\ 0 & 0 & a''_{43} & a''_{44} & b''_4 \end{bmatrix}$$

$$\text{Zerando a terceira coluna} \rightarrow [A'+b'] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & b_1 \\ 0 & a'_{22} & a'_{23} & a'_{24} & b'_2 \\ 0 & 0 & a''_{33} & a''_{34} & b''_3 \\ 0 & 0 & 0 & a'''_{44} & b'''_4 \end{bmatrix}$$

É possível observar que os coeficientes  $a_{kp}$  e  $b_k$  da matriz  $[A' + b']$  triangularizada não são os mesmos da matriz  $[A' + b']$  original.

Resolve-se o sistema por recorrência por meio da seguinte equação:

$$x_k = \frac{\left[ b_k - \sum_{p=k+1}^4 (a_{kp} \cdot x_p) \right]}{a_{kk}}, \quad k = 4, 3, 2, 1$$

Sendo:  $x_k$  – coeficiente da  $k$ -ésima linha da matriz  $[x]$  (adimensional);  $a_{kp}$  e  $b_k$  – coeficientes da matriz triangularizada na  $k$ -ésima linha da  $p$ -ésima coluna (adimensional);  $a_{kk}$  – coeficiente da matriz triangularizada presente na diagonal principal (adimensional).

O determinante da matriz  $[A' + b']$  triangularizada é calculado a partir do produto dos coeficientes  $a_{kk}$  da diagonal principal, conforme segue:

$$|A'+b'| = \prod_{k=1}^4 a_{kk} \quad \rightarrow \quad |A'+b'| = a_{11} \cdot a'_{22} \cdot a''_{33} \cdot a'''_{44}$$

A partir da resolução da matriz, os valores dos coeficientes  $ky_I$ ,  $ky_{II}$ ,  $ky_{III}$  e  $ky_{IV}$  foram encontrados.